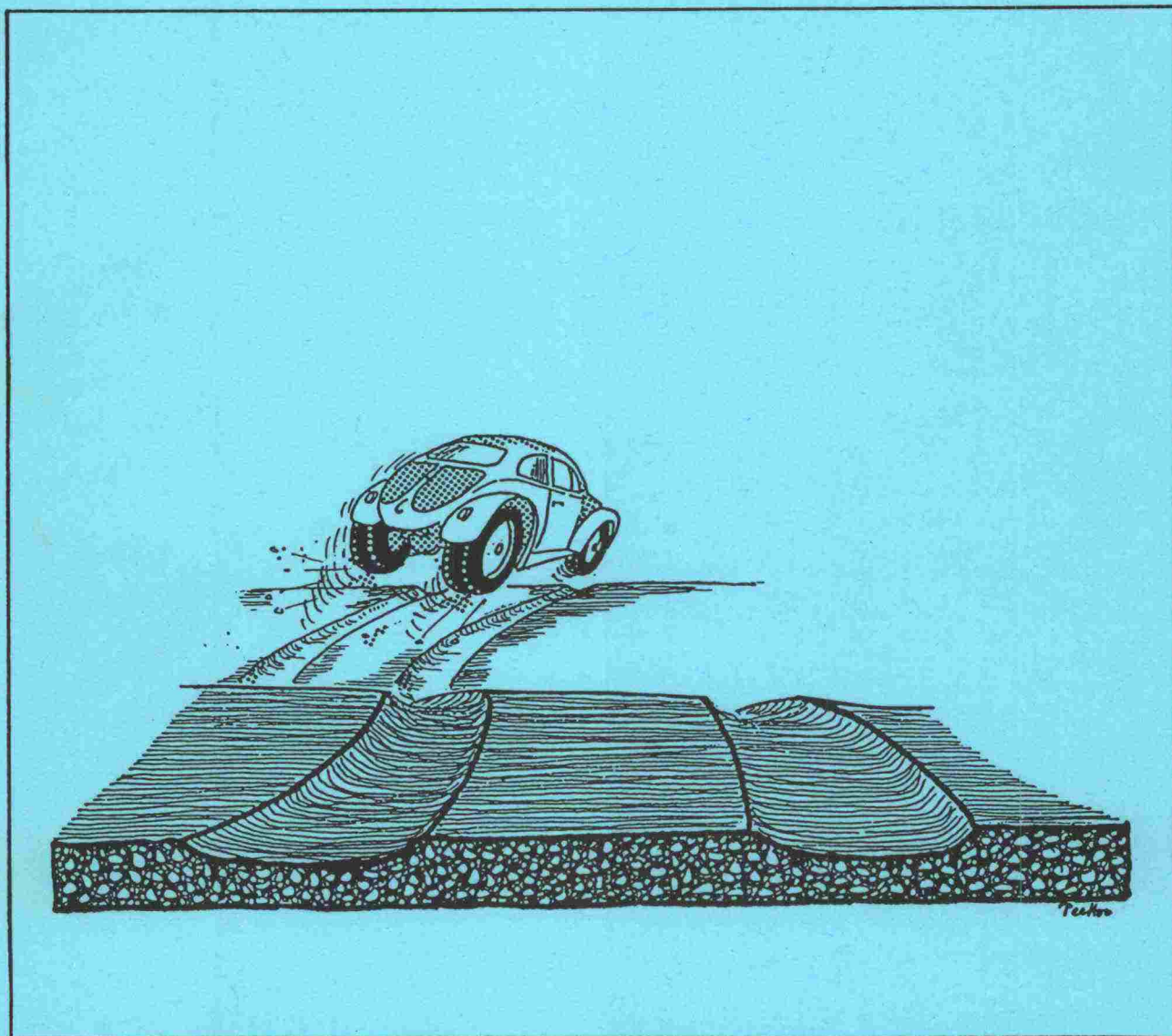


TIEPÄÄLLYSTEKIVIAINEKSIEN KULUTUSKESTÄVYYDESTÄ
JA TESTAAMISEEN SOVELTUVISTA KOEMENETELMISTÄ



Tie - ja vesirakennushallitus 1987

TVH 743952

08
774

1944. 12. 1. JAVIMINIS. 1. 1944. 12. 1.
1944. 12. 1. JAVIMINIS. 1. 1944. 12. 1.



1944. 12. 1. JAVIMINIS. 1. 1944. 12. 1.

87:745/2

TIEPÄÄLLYSTEKIVIAINEKSIEN KULUTUSKESTÄVYYDESTÄ
JA TESTAAMISEEN SOVELTUVISTA KOEMENETELMISTÄ



1. The first part of the document is a letter from the President of the United States to the Congress, dated January 3, 1862. It is a very long letter, and it contains a great deal of information about the state of the country at that time. It is a very important document, and it is one of the most interesting documents in the collection.

1. The first of these is the fact that the
2. second of these is the fact that the
3. third of these is the fact that the
4. fourth of these is the fact that the
5. fifth of these is the fact that the
6. sixth of these is the fact that the
7. seventh of these is the fact that the
8. eighth of these is the fact that the
9. ninth of these is the fact that the
10. tenth of these is the fact that the

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on osa Tie- ja vesirakennushallituksen käyttöosaston kesällä 1985 aloittamaa päällystetutkimusta, jolla pyritään kehittämään tiepäällysteiden kulutuskestävyyttä. Tässä osatutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan lähinnä kiviaineksen lujuutta ja kulutuskestävyyttä. Selvitys liittyy esitutkimuksena asfalttipäällysteiden tutkimusohjelmaan (ASTO). Muina tutkimusohjelman esitutkimuksina on julkaistu seuraavat raportit:

- Nieminen P. ja Pylkkänen K. (1987) Kiven ja bitumin välisestä tartunnasta. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Raportti 16.
- Niemi J., Julku T. ja Lappalainen K. (1987) Kiviaineksen lujuuskokeiden vertailu päällysteen kulutuskestävyyden arvioinnissa. TKK. Vuoriteollisuusosasto, louhintatekniikan laboratorio.

Tutkimukset liittyvät ASTO- projektin materiaalityöryhmän tutkimuskenttään.

Tätä osatutkimusta on ohjannut TVH:n laboratorion esimies fil.lis. Martti Eerola. Tutkimuksen eri yhteyksissä ovat antaneet hyviä neuvoja myös TVH:n maatutkimustoimiston geologi Jorma Porras, kunnossapitotoimiston dipl.ins. Mats Reihe, maatutkimustoimiston tarkastaja Reijo Orama, VTT:n tutkimusprofessori Asko Saarela sekä TKK:n louhintatekniikan laboratorion dosentti Pekka Särkkä.

Helsingissä 11.9.1987

Kari Lappalainen

100-244-100 4021

MAITJAV
KÄYTTÖ
Helsingissä

TIIVISTELMÄ

Keskeisimmät kiven kulutuskestävyyteen vaikuttavat tekijät ovat kiven mineraalikoostumus, eheys, rapautuneisuus sekä kiven tekstuuritekijöihin kuuluvat mineraalien raekoko, yhteenliittyminen ja keskinäinen sijainti.

Nastarengasliikenteen kulutuksessa tiepäällysteen kivrakeisiin kohdistuu sekä äkillisiä nastan iskuja että nastan raapaisuja.

Parhaiten nastarengasliikenteen kulutusta kestävät sellaiset ehjät, rapautumattomat, suuntautumattomat tai vain heikosti suuntautuneet hienorakeiset kiviainekset, joissa kovien mineraalien joukossa on kiven elastisuuden lisäämiseksi tasaisesti hieman pehmeitä/sitkeitä mineraaleja.

Kulutusta hyvin kestävässä kiviaineksissa mineraalit ovat liittyneet toisiinsa epämääräisenmuotoisilla raerajoilla sekä mineraalien raekoko vaihtelee siten, että hieman erisuuruiset mineraalit sijaitsevat sekaisin toistensa lomissa.

Erilaisista kiven tekstuuritekijöistä johtuen tiepäällysteisiin tarkoitettun kiviaineksen kulutuskestävyyttä ei hyvin pehmeitä kivilajeja (Mohsin kovuusasteikolla alle kolme) lukuunottamatta voida sitoa suoraan kivilajiin. Niinpä tiepäällysteisiin soveltuvia, kulutusta hyvin kestäviä kiviaineksia on löydettävissä hyvin monista magma- ja metamorfisista kivilajeista.

Tiepäällysteessä olevien kivrakeiden kulumistavasta johtuen tiepäällysteeseen tarkoitettavan kiviaineksen kulutuskestävyyden arvioimisessa tulee ottaa huomioon sekä kiven iskunkestävyys että raaputuslujuus.

Tarkasteltaessa tässä tutkimuksessa käytettyjen laboratoriokokeiden tuloksien riippuvuutta tilastollisilla menetelmillä toisistaan, havaittiin kiviaineksien mineraalien raekoon yhdessä kiven pistekuormitusindeksin kanssa selittävän parhaiten kiviaineksen kulutuskestävyyttä. Kiviaineksen kulutuskestävyyden vertailukohteena käytettiin hioutuvuusluvun ja parannetun haurausarvon eri yhdistelmiä.

Laboratoriokokeiden perusteella koemateriaalina käytetyistä kiviaineksista parhaiten kulutusta kestävät Koskenkylän tonaliitti ja Rytylin kvartsiitti. Koekiviaineksista heikoimmiksi puolestaan osittautuivat Vehmaan graniitti ja Isotalon kiillegneissi.

SISÄLLYSLUETTELO

	Sivu
ALKUSANAT	1
1. JOHDANTO	2
2. TUTKIMUKSEN TARKOITUS	2
3. TUTKIMUSMENETELMÄT	3
4. TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄ KOEMATERIAALI	4
5. TIEPÄÄLLYSTEIDEN KULUMINEN	9
6. KIVEN LUJUUTEEN JA KULUTUSKESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVAT KIVIAINESTEKIJÄT	13
6.1 Mineraalikoostumus	14
6.2 Mineraalien raekoko	16
6.3 Mineraalien lohkeavuus ja muoto	17
6.4 Mineraalien suuntautuneisuus	20
6.5 Mineraalien ryhmittäminen	22
6.6 Kiven rikkonaisuus	22
6.7 Kiven rapautuneisuus	24
7. TIEPÄÄLLYSTEKIVIAINEKSEN LUJUUDEN JA KULUTUS- KESTÄVYYDEN MÄÄRITTÄMINEN	27
7.1 Kulutuskokeet	27
7.1.1 Los Angeles-koe	27
7.1.2 Haurausarvokoe	28
7.1.3 Hioutuvuuskoe	29
7.1.4 Tröger-kulutuskoe	31
7.1.5 Poranäytteiden kulutuskoe	35
7.2 Kalliomekaaniset lujuus- ja porattavuus- kokeet	38
7.2.1 Kimmomoduli	38
7.2.2 Poissonin luku	39
7.2.3 Puristusrakenteen lujuus	40
7.2.4 Vetomurtolujuus	40
7.2.5 Pistekuormitusindeksi	41
7.2.6 Sieversin J'-arvo	42
7.2.7 Proto 20'-arvo	43
7.2.8 Haurausarvo S20'	44
7.2.9 Porausnopeusindeksi	45
7.3 Kivirakeiden muoto	46
7.4 Hietutkimukset	47
8. KULUTUSKOKEIDEN JA MUOTOARVOMITTAUKSIEN TULOKSET	48
8.1 Los Angeles-koe	48
8.2 Parannettu haurausarvokoe	50
8.3 Hioutuvuuskoe	52
8.4 Tröger-kulutuskoe	54
8.5 Poranäytteiden kulutuskoe	56
8.6 Muotoarvo	59

9.	KALLIOMEKAANISIEN LUJUUS- JA PORATTAVUUSKOKEIDEN TULOKSET	61
9.1	Kimmomoduli	61
9.2	Puristusmurtolujuus	62
9.3	Pistekuormitusindeksi	64
9.4	Porausnopeusindeksi	66
9.5	Mineraalien raekoko	68
9.6	Vickersin kovuus	69
10.	TULOKSIEN VIRHETEKIJÄT	70
11.	KOETULOKSIEN TARKASTELU	71
11.1	Tiepäällysteisiin soveltuvat kivi- ainekset	71
11.2	Tiepäällystekiviaineksien testaamiseen soveltuvat koemenetelmät	73
11.2.1	Selitettävänä muuttujana yh- distelmä <u>parannettu hauraus-</u> arvo $\times \sqrt{\text{hioutuvuusluku}}$	76
11.2.2	Selitettävänä muuttujana yh- distelmä <u>hioutuvuusluku</u> $\times \sqrt{\text{parannettu haurausarvo}}$	79
11.2.3	Selitettävänä muuttujana yh- distelmä <u>hioutuvuusluku</u> \times parannettu haurausarvo	81
12.	YHTEENVETO	84
	KIRJALLISUUSVIITTEET	
	LIITTEET	

1. JOHDANTO

Nastarengasliikenteen kuluttamien päällysteiden kunnossapito ja uusiminen aiheuttaa yhteiskunnalle vuosittain useiden satojen miljoonien markkojen kustannuksia. Näitä kuluja on pyritty vähentämään muun muassa lisäämällä päällysteiden kuluskestävyyttä.

Koska päällysteiden kuluskestävyys riippuu keskeisesti siinä käytettävästä kiviaineksesta on päällysteissä käytettävän kivimateriaalin lujuuteen ja kuluskestävyyteen jouduttu kiinnittämään entistä enemmän huomiota.

Kiviaineksen lujuutta ja kuluskestävyyttä on tähän asti arvosteltu lähinnä Los Angelesluvun ja haurausarvon perusteella. On kuitenkin osoittautunut, että nämä menetelmät eivät aina osoita kivimateriaalin todellista kuluskestävyyttä.

Tuntemalla päällysteen kiviainekseen kohdistuvat kuluskomponentit sekä päällysteessä käytettävän kiviaineksen lujuuteen ja kuluskestävyyteen keskeisimmin vaikuttavat kiviainestekijät voidaan teiden päällysteisiin valita kulususta hyvin kestäviä kiviaineita. Samoin voidaan kehittää kiviaineksen testaamiseen soveltuvia menetelmiä niin, että ne testaavat kiviaineksen todellista kuluskestävyyttä.

2. TUTKIMUKSEN TARKOITUS

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, mitkä keskeisimmät kiviainestekijät vaikuttavat kiven lujuuteen ja kuluskestävyyteen. Lisäksi tutkimuksella pyritään selvittämään minkä tyyppiset kiviainekset ovat päällysteitä ajatellen luja ja kulususta kestäviä sekä millä olemassa olevilla menetelmillä päällysteissä käytettäviä kiviaineita tulisi testata.

3. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tämä tutkimus jakautuu aikaisemmista tutkimuksista kerättyjen tietojen esittämiseen, tutkimuksen yhteydessä suoritettuihin kokeisiin sekä näiden kokeiden tuloksien tarkasteluun.

Tutkimuksen alkuosassa perehdytään aikaisempien tutkimuksien ja alan kirjallisuuden perusteella tiepäällysteessä olevien kivirakeiden kulumistapahtumaan sekä kiven lujuuteen ja kulutuskestävyyteen keskeisimmin vaikuttaviin kiviainestekijöihin.

Tutkimuksen kokeellisessa osassa määritetään koemateriaaliksi valittujen kivilajiltaan ja rakenteeltaan toisistaan poikkeavien kiviaineksien lujuusparametrit ja kulutuskestävyys erilaisilla lujuus-, porattavuus- ja kulutuskokeilla. Koekiviaineksien tarkempi koostumus ja rakenne selvitetään mikroskooppitutkimuksella.

Koetuloksien tilastollisien käsittelyjen perusteella tehdään päätelmiä siitä, kuinka käytetyt menetelmät soveltuvat tiepäällysteisiin tarkoitettun kiviaineksen lujuuden ja kulutuskestävyyden testaamiseen.

Kiviaineksen lujuus-, porattavuus- ja kulutuskokeet sekä kiviaineksien geologiset selvitykset on tehty TVH:n, Lemminkäinen Oy:n, VTT:n tie- ja liikennelaboratorion, Helsingin teknillisen korkeakoulun louhintatekniikan sekä Rautaruukki Oy:n tutkimuslaitoksen laboratorioissa. TKK:n louhintatekniikan laboratorion suorittamien tutkimuksien tulokset on esitetty myös omana raporttina /28/.

Seuraavassa on esitetty eri laboratorioissa koemateriaalina käytetyistä kiviaineksista suoritettut tutkimukset:

TVH:n laboratorio

- kiviaineksen kiintotiheyden määrittäminen
- kivirakeiden muodon määrittäminen
- Los Angeles-koe
- parannettu haurausarvokoe
- hioutuvuuskoe

VTT:n tie- ja liikennelaboratorio

- kiviaineksien kulutuskokeet poranäytteiden kulutuslaitteella

Lemminkäinen Oy:n laboratorio

- kiviaineksien kulutuskokeet Neste Oy:n Tröger-kulutuslaitteella

TKK:n louhintatekniikan laboratorio

- ohuthietutkimukset (mineraalikoostumus, tekstuuri, mineraalien muuttuneisuus, mikrorakoilu jne.)
- kimmomodulin määrittäminen
- Poissonin luvun määrittäminen
- puristusmurtolujuuden määrittäminen
- vetomurtolujuuden määrittäminen
- pistekuormitusindeksin määrittäminen
- Vickersin kovuuden määrittäminen
- Sieversin J' -arvon määrittäminen
- Proto 20'-arvon määrittäminen
- haurausarvon $S_{20'}$ määrittäminen
- porausnopeusindeksin (PNI) määrittäminen

Rautaruukki Oy:n tutkimuslaitoksen laboratorio

- röntgenfluorisenssimenetelmällä tehdyt kokokivianalyysit

4. TUTKIMUKSESSA KÄYTETTÄVÄ KOEMATERIAALI

Tässä tutkimuksessa koemateriaalina käytettävät kiviainekset on valittu Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian laboratorion kesällä 1985 eri puolella Suomea toimineilta asfalttiasemilta keräämistä tiepäälysteisiin käytetyistä kalliomurskemateriaaleista. Näistä kiviaineksista Tampereen teknillisellä korkeakoululla on tutkittu mm. kivimateriaalin hienoaineksen ominaisuuksia.

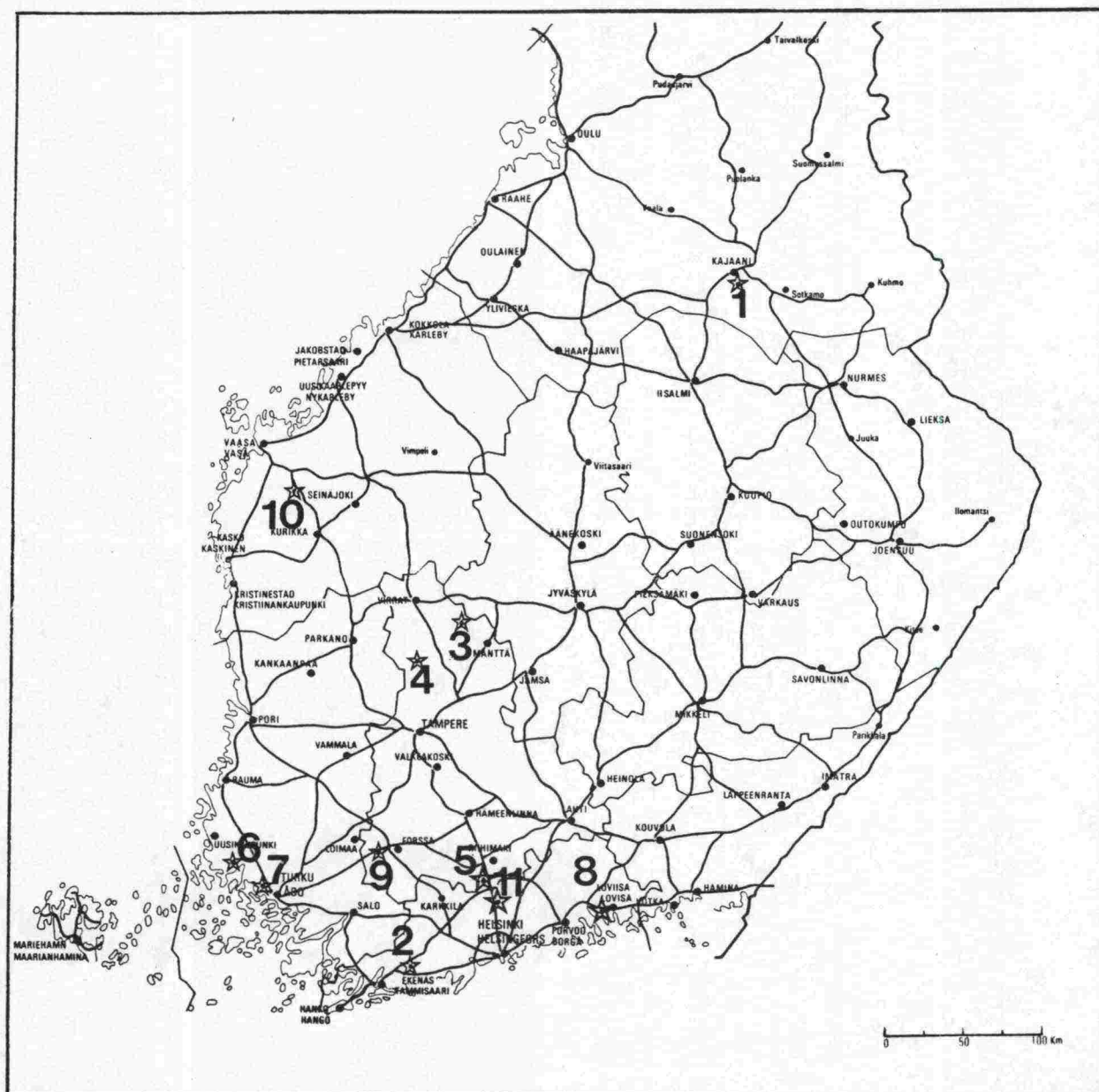
Koemateriaalina käytettävien kiviaineksien mineraalikoostumuksen ja rakenteen edustavuuden lisäämiseksi mukaan on otettu muutamia muita eri TVL:n piirien tiepäällysteissä käyttämiä kiviaineksia.

Tutkimuksen ja eri laboratoriokokeiden liiallisen laajenemisen välttämiseksi koemateriaalina käytettävien kiviaineksien määrä on rajoitettu yhteentoista. Kuvassa 1 on esitetty koemateriaalina käytettyjen kiviaineksien ottopaikat sekä liitteessä 1 ko. kiviaineksista valmistettujen päällysteiden tyyppi ja tieosuus.

Koemateriaalina olevat kiviainekset ovat Nukarin sora-mursketta lukuunottamatta kalliomurskeita. Keskittyminen kalliomurskeisiin johtuu siitä, että kallion kivilaji ja rakenne voidaan määrittää soramateriaaleja luotettavammin. Soramateriaaleissa kiviaineksen laatu ja kivilaji voivat vaihdella runsaasti jopa samassa esiintymässäkin, koska sora-muodostumien kiviaines edustaa laajan alueen kallioperän kivilajikoostumusta sekä kiviaines on kasaantunut vaihtelevien glasifluviaalisten prosessien vaikutuksesta. Kallioperässä kivilaji ja kivilaatu eivät sitä vastoin vaihtele niin runsaasti tai vaihtelut ovat ennakoitavissa esimerkiksi kallioperäkartoituksen avulla. Koska soramateriaalista läpimitaltaan 100-120 mm:n suuruisien kairasydännäytteiden kairaaminen on hankalaa eikä näyte edustaisi kuin yhtä kivikappaletta, ei soramateriaalista ole valmistettu kairasydännäytteitä. Tästä johtuen koemateriaalina olevasta Nukarin soramurskenäytteestä on tehty vain osa lujuus- ja kulutuskokeita.

Koemateriaalina käytetyt kiviainekset ovat silmämääräisesti määritettynä soramursketta lukuunottamatta rapautumattomia ja ehjiä. Kiviainekset edustavat kuvan 2 mukaisesti sekä vähän että runsaasti piidioksidia (SiO_2) sisältäviä kivilajeja. Piidioksidin määrä on määritetty röntgenfluorisenssimenetelmällä ja se ilmoittaa näytteen kokonaispiidioksidimäärän.

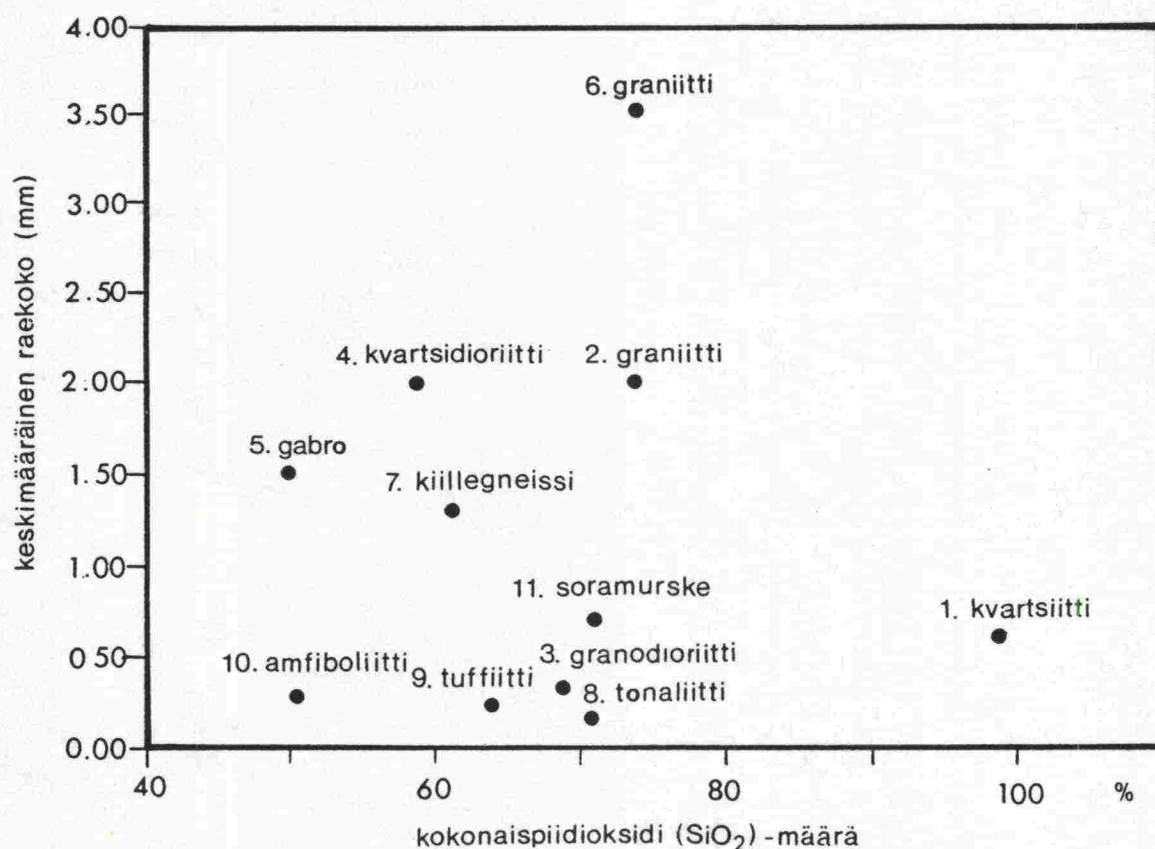
Kuva 1. Koemateriaalina käytettyjen kiviaineksien ottopaikat



Näyte-numero	Kiviaines	Ottopaikka	TVL:n piiri
1.	Kvartsiitti	Rytyli	Kainuun piiri
2.	Graniitti	Mustio	Uudenmaan piiri
3.	Granodioriitti	Ilvesvuori	Hämeen piiri
4.	Kvartsidioriitti	Nummenoja	Hämeen piiri
5.	Gabro	Usmi	Uudenmaan piiri
6.	Graniitti	Vehmaa	Turun piiri
7.	Kiillegneissi	Isotalo	Turun piiri
8.	Tonaliitti	Koskenkylä	Uudenmaan piiri
9.	Tuffiitti	Rippu	Hämeen piiri
10.	Amfiboliitti	Paapanluhdanmäki	Vaasan piiri
11.	Soramurske	Nukari	Uudenmaan piiri

Koekiviaineksien päämineraalien keskimääräisen raekoon suhteen kiviainekset ovat sekä hienorakeisia (raekoko alle 1 mm) että keskirakeisia (raekoko 1-5 mm). Kiviaineksien keskittyminen keski-hienorakeisiin johtuu siitä, että päällystemateriaaleissa pyritään välttämään usein lujuudeltaan heikoiksi osoittautuneita karkearakeisia kiviaineksia.

Kuva 2. Koemateriaalina käytettyjen kiviaineksien piidioksidimäärä (SiO_2) ja keskimääräinen mineraalien raekoko.



Mineraalien raekokojakautuman suhteen koemateriaalina olevia kiviaineksia voidaan pitää joko tasarakeisina, porfyryrisinä tai vaihtelevan raekoon omaavina kiviaineksina. Tasarakeisissa kivissä mineraalit ovat lähes samansuuruisia. Porfyryrisissä kivissä perusmassan muodostavien mineraalien joukossa on näitä huomattavasti suurempia mineraaleja. Vaihtelevan raekoon omaavissa kivissä mineraalien raekoko vaihte-

lee joko satunnaisesti tai esimerkiksi systemaattisesti kuten kerroksellisissa ja kerrallisissa kivilajeissa.

Mineraalien keskinäisen järjestymisen suhteen koemateriaalina olevat kiviainekset ovat suuntautumattomia, heikosti, kohtalaisesti tai voimakkaasti suuntautuneita.

Kiviainesesiintymien kivilaadun suhteen kiviainekset ovat joko homogeenisia eli tasalaatuisia tai heterogeenisiä eli vaihtelevia (taulukko 1).

Taulukko 1. Koemateriaalina käytettävien kiviaineksien rakenne.

Näyte- numero	Kivilaji	Ottopaikka	Raekokojakautuma	Suuntautuneisuus	Esiintymän kivi- laadun tasalaa- tuisuus
1.	Kvartsiitti	Rytyli	tasarakeinen, kerroksellinen	heikosti suuntau- tunutta	heterogeeninen
2.	Graniitti	Mustio	raekoko hieman vaihteleva	heikosti suuntau- tunutta	heterogeeninen
3.	Granodioriitti	Ilvesvuori	raekoko vaihteleva, porfyyrinen	heikosti suuntau- tunutta	homogeeninen
4.	Kvartsidioriitti	Nummenoja	tasarakeinen	suuntautumaton	homogeeninen
5.	Gabro	Usmi	tasarakeinen	suuntautumaton	homogeeninen
6.	Graniitti	Vehmaa	tasarakeinen	suuntautumaton	homogeeninen
7.	Kiillegneissi	Isotalo	raekoko erittäin vaihteleva, porfyyrinen	kohtalaisesti suuntautunutta	heterogeeninen
8.	Tonaliitti	Koskenkylä	raekoko vaihteleva	kohtalaisesti suun- tautunutta	heterogeeninen
9.	Tuffiitti	Rippu	raekoko vaihteleva, porfyyrinen	kohtalaisesti suun- tautunutta	heterogeeninen
10.	Amfiboliitti	Paapanluhdan- mäki	raekoko hieman vaihteleva	voimakkaasti suun- tautunutta	heterogeeninen
11.	Soramurske	Nukari	raekoko vaihteleva	-	heterogeeninen

Raekooltaan 12-20 mm olevasta Nukarin soramurskefraktiosta otettujen sadan kivirakeen perusteella soramurskeessa on noin 60 % keskirakeista graniittia, 20 % hienorakeista kvartsi-maasälpä-kiilleliusketta ja 20 % keskirakeista kiillegneissiä. Pintaosastaan kaikki kivirakeet ovat soramateriaalille tyypillisesti vähän rapautuneita (Rpl). Rakenteeltaan sora-näytteen graniittiset kivet ovat valtaosaltaan tasarakeisia

ja suuntautumattomia. Kiilleliusketta olevien kivirakeiden mineraalien raekoko on vaihteleva ja niiden mineraalit ovat kohtalaisesti suuntautuneita. Kiillegneississä oleva kiviaines on porfyyristä ja heikosti suuntautunutta.

Koemateriaalina olevista kiviaineksista ainoastaan Vehmaan graniitti ja Usmin gabro, joita louhitaan tai on louhittu myös teollisuus- tai rakennuskiviksi, ovat niin homogeenisista esiintymistä, että niiden näytteiden voidaan olettaa edustavan myös näytteen ottopaikkaa laajempaa aluetta. Muut kiviainekset ovat siinä määrin heterogeenisiä, ettei yhdestä kiviäytteestä määritettyjen ominaisuuksien voida varmuudella katsoa edustavan koko esiintymää. Erityisen varauksella tuloksien edustavuuteen täytyy suhtautua normaalistikin heterogeenisissä soramateriaaleissa.

Liitteessä 2 on esitetty ko. kallionäytteistä Teknillisen korkeakoulun louhintatekniikan laboratoriossa tehtyjen ohut-
hietutkimuksien kivilajikuvaukset /28/.

5. TIEPÄÄLLYSTEIDEN KULUMINEN

Päällysteiden urautuminen johtuu päällysteiden kulumisesta sekä päällysteiden ja/tai alusrakenteiden tiivistymisestä ja deformatumisesta /14/. Päällysteiden urien muodostumisessa kulumisen erottaminen tiivistymisestä ja deformaatiosta on usein hankalaa. Vanhemmissa päällysteissä (yli 1-2 vuotta) urien on havaittu muodostuvan siten, että talviaikana vallitsevana tekijänä on nastarengasliikenteestä johtuen kulumisen ja kesäaikana osittain korkeasta lämpötilasta johtuen deformaatio. Vastavalmistuneissa asfalttipäällysteissä deformaation osuus urien muodostumisessa on usein huomattavan suuri /25/.

Päällystetyypistä, säätekijöistä ja liikenteestä riippuen deformaation ja kulumisen keskinäiset suhteet kokonaisuranmuodostumisessa voivat kuitenkin eri aikoina vaihdella /14/.

Päällysteiden kulumisesta aiheutuvan urautumisen on todettu johtuvan hyvin monesta eri tekijästä. Päällysteiden kulumi-

seen vaikuttaa mm. päällysteen ikä, nastarenkaita käyttävien ajoneuvojen lukumäärä, ajonopeus, ajoneuvojen paino, ajotapa, nastojen tyyppi, paino, ulkonema, lukumäärä ja luonnollisesti nastarenkaiden käyttöajan pituus. Lisäksi päällysteiden kulumiseen vaikuttaa ilman lämpötila, kosteus, ajoradan geometria sekä päällysteessä käytetyn kiviaineksen ja sideaineen määrä ja laatu /13,26,30/.

Päällysteen ja siinä olevien kivirakeiden kulumisen johtuu suurimmaksi osaksi nastarengasliikenteen kulutuksesta /13,27,45/. Kulumista aiheuttaa vähäisemmässä määrin myös kiviaineksen mekaaninen ja kemiallinen rapautuminen.

Nastan päällystettä kuluttava vaikutus jakautuu nastan aiheuttamaan iskuun ja raapaisuun sekä nastan ja renkaan yhdessä muodostamaan hiontavaikutukseen.

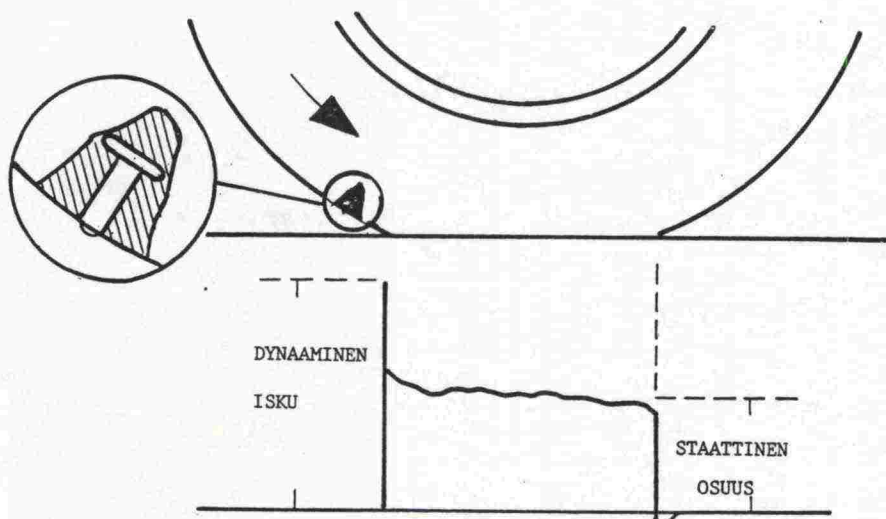
Ajoneuvon liikkuessa (ajonopeus yli 20-30 km/h) nasta aiheuttaa tienpintaan ensin äkillisen nastan liike-energiasta johtuvan dynaamisen iskun. Dynaamisen iskun kesto aika on hyvin lyhyt, mutta sen voima (vaikutus) voi olla hyvinkin suuri (kuva 3). Nastan tiekosketuksessa ensimmäisen dynaamisen iskun jälkeen voi seurata vielä useita heikompia iskupulsseja.

Dynaamisen iskun jälkeen seuraa ns. staattisen voiman osuus, joka on seurausta renkaan nastan välityksellä tiehen kohdistamasta puristavasta voimasta (kuva 3). Staattisen voiman osuus kestää koko nastan tiekosketuksen ajan.

Dynaamisen iskun jälkeen nastasta kohdistuu tien pintaan myös ns. kehä- ja sivuvoimia, joilla on havaittu olevan usein suuri merkitys päällysteen kulumistapahtumassa. Kehävoimat vaikuttavat renkaan pyörimissuunnassa ja sivuvoimat renkaan sivusuunnassa.

Ennen nastan irtoamista alustastaan nasta aiheuttaa usein vielä vähäisen raapaisun, joka on seurausta renkaan muodonmuutoksen palautumisesta /2,13/.

Kuva 3. Nastavoimien kehittyminen tiekontaktin aikana /11/.

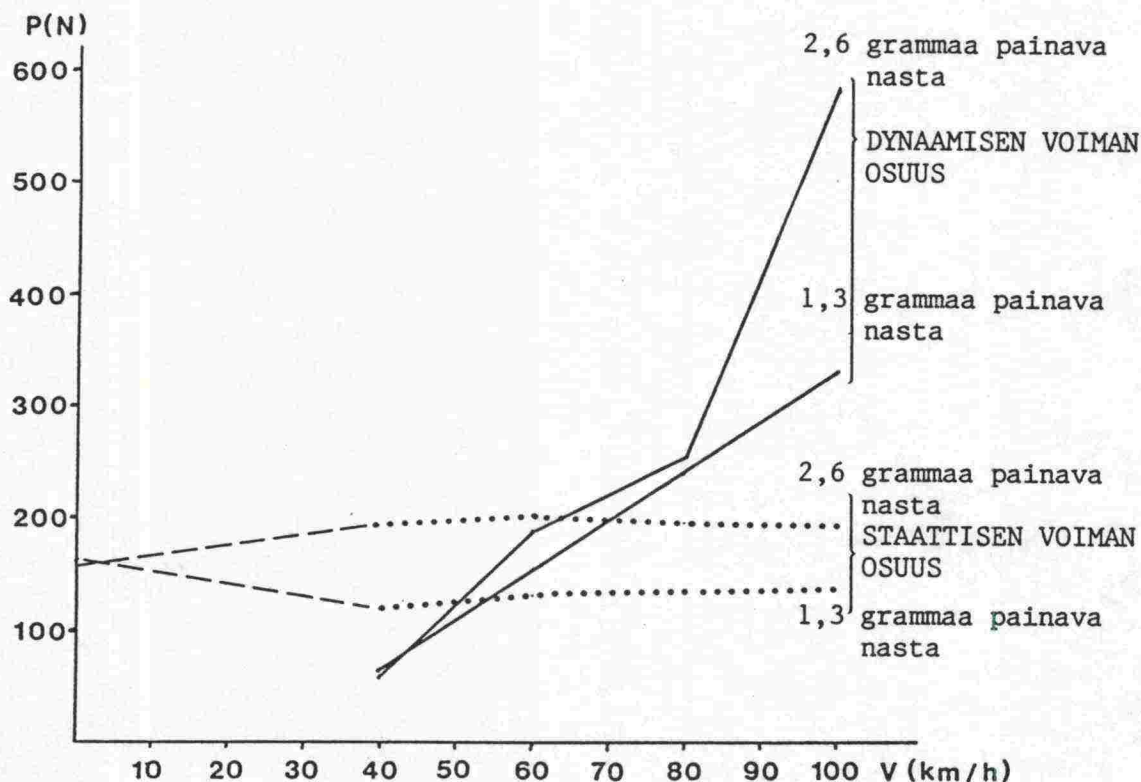


Nastarengasajoneuvojen nopeus vaikuttaa ratkaisevasti koko päällysteen kulumiseen, sillä nastan iskuvoiman suuruus kasvaa voimakkaasti ajoneuvon nopeuden lisääntyessä (kuva 4). Suurissa nopeuksissa nastan iskuvoiman osuus on muita nastan aiheuttamia voimakomponentteja huomattavasti suurempi. Staattisen voiman osuus ei sitä vastoin paljonkaan muutu nopeuden lisääntyessä. Staattisen voiman suuruuteen vaikuttaa lähinnä renkaan ja nastan rakenne /2/.

Kehä- ja sivuvoimia esiintyy erikoisesti nastan raapaisujen yhteydessä. Tasaisella nopeudella suoraan ajettaessa kehä- ja sivuvoimat ovat normaalisti pieniä, mutta renkaan ollessa vedon tai jarrutuksen alaisena niiden osuus kasvaa huomattavasti. Vähäisessä määrin sivuvoimia aiheutuu myös pyörien asentokulmista (aura- ja camber-, caster- jne. kulmat).

Edellä kuvattujen voimakomponenttien keskinäiset suhteet vaihtelevat ajoradan geometriasta, renkaan ja nastan rakenteesta, ajonopeudesta ja ajotavasta riippuen. Esimerkiksi nastan iskun osuus korostuu ajettaessa suurella ja tasaisella nopeudella. Nastan raapaisun osuus korostuu kiihdytyksissä, jarrutuksissa ja ajoradan kaarteissa /2,30/.

Kuva 4. Nastan dynaamisen ja staattisen pistovoiman muutos nopeuden kasvaessa kahdella eripainoisella nastalla /2/.



Nastarengasliikenne aiheuttaa vähitellen päällysteen pinnassa olevien kivirakeiden sekä sideaineen ja hienon kiviaineksen muodostaman mastiksin kulumisen. Päällysteen kuluminen alkaa yleensä ensin mastiksin kulumisena ja vasta tämän jälkeen suurempien kivirakeiden kulumisena. Mastiksin nopeammasta kulumisesta johtuen suuremmat kivirakeet jäävät koholle päällysteen pintaan. Kesällä päällysteen pinta jälleen tasoittuu koholle jääneiden kivirakeiden painuessa vähitellen alemmaksi /26,27/.

Päällysteen pinnassa olevien kivirakeiden kuluminen ilmenee vähittäisenä kivirakeiden särmien pyöristymisenä, hioutumisena tai kivirakeen lohkeamisena ja murtumisena. Kuluminen on kuitenkin aina eri mittakaavassa tapahtuvaa kiven tai sen osan rikkoutumista.

Kivirakeen rikkoutuminen tapahtuu kun siihen kohdistuva jännitys ylittää kiven veto- tai leikkauslujuuden /19/. Kiven rikkoutumista edeltää aina mikroraon tai -rakojen syntyminen. Lopullinen kivirakeen rikkoutuminen tapahtuu näiden mikrarakojen tai -raon mukaisesti. Mikrorakojen muodostumisherkkyys, suunta ja määrä riippuvat viime kädessä kiviainestekijöistä kuten rakenteesta ja mineraalien sekä kiven lohkeamistaipumuksesta.

Kivirakeisiin syntyvät mikroraot ja murtopinnat "kulkevat" kivessä joko mineraalien halki tai mineraalien välisiä raerajoja pitkin. Murtopinnan tai mikroraon "kulkiessa" mineraalin halki rako tai murtopinta määräytyy yleensä mineraalin lohkeavuuden mukaisesti. Tällöin rako- tai murtopinta on joko mineraalin lohkeavuussuunnan mukainen taso tai epämääräinen murrospinta. Murrospinta syntyy yleensä mineraaleille, joilla ei esiinny selvää lohkeavuutta. Mikroraon tai murtopinnan noudattaessa mineraalien välisiä raerajoja murto- tai rako-pinta on mineraalien omamuotoisuudesta riippuen taso tai epämääräisen muotoinen pinta.

Päällysteen pinnassa olevat kivirakeet eivät yleensä rikkoutu ensimmäisistä nastan iskuista ja raapaisuista, vaan kivirakeiden rikkoutuminen tapahtuu vasta nastojen iskujen ja raapaisujen riittävästi toistuttua.

6. KIVEN LUJUUTEEN JA KULUTUSKESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVAT KIVIAINESTEKIJÄT

Keskeisimmät erikoisesti raekooltaan pienien kivirakeiden lujuuteen ja kulutuskestävyyteen vaikuttavat kiviainestekijät ovat kiviaineksen mineraalikoostumus, rapautuneisuus sekä tekstuuritekijöihin kuuluvat mineraalien raekoko, raemuoto, mineraalien keskinäinen ryhmittyminen ja suuntautuneisuus. Yksittäisistä mineralogisista tekijöistä tärkeimpiä ovat kovuus ja lohkeavuus. Lisäksi kiviaineksen lujuuteen ja kulutuskestävyyteen vaikuttaa kiven rikkonaisuus ja kivirakeiden muoto.

6.1 Mineraalikoostumus

Koska mineraaleilla on toisistaan huomattavastikin poikkeavat fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet, vaikuttaa mineraalikoostumus keskeisesti mm. kiviaineksen mekaaniseen lujuuteen. Vaikka kullakin kivilajilla on lähes tietty mineraalikoostumus ei kiviaineksen lujuutta tai kulutuskestävyyttä voida sitoa yksiselitteisesti kivilajiin, sillä kullakin kivilajilla kiven rakenne, mineraalien suuntautuneisuus ja ryhmittyminen, rakojen ja mikrorakojen määrä ja jopa mineraalikoostumuskin vaihtelevat.

Mineraalikoostumus ja sitä kautta kivilaji antaa kuitenkin viitteitä mm. tiepäällystekiviaineksien kannalta tärkeistä kiven hauraus-, sitkeys-, kovuus- ja pehmeysominaisuuksista. Esimerkiksi graniitti, granodioriitti, dioriitti, kvartsiitti ja kvartsi-maasälpäliuskeet, jotka koostuvat pääosin kovista mineraaleista kestävät yleensä hyvin raapivaa kulutusta. Sitä vastoin pehmeämmät kivilajit kuten peridotiitti, gabro, kalkkikivi, amfiboliitti, serpentiini-, talkki-, kloriitti- ja kiilleliuskeet, jotka koostuvat pääosin pehmeistä mineraaleista kestävät yleensä raapivaa kulutusta huonosti.

Pehmeät kivet sietävät kuitenkin sitkeiden kivien tavoin yleensä äkillisiä iskuja hyvin kun taas hyvin kovat kivet kestävät hauraudestaan johtuen usein iskuja huonosti.

Koska teiden päällysteiden kivrakeisiin kohdistuu sekä nastojen raapaisuja että äkillisiä nastan iskuja, tulee päällysteissä käytettävässä kiviaineksessa olla raaputusta kestävien kovien mineraalien joukossa tasaisesti myös sitkeitä/pehmeitä (noin 5-20%) mineraaleja.

Mineraalin ja kiven hauraus- tai sitkeysominaisuus perustuu yksiaksiaalisella puristuskokeella tutkittavan kiven karakteristiseen jännitys-muodonmuutoskäyttäytymiseen. Hauraille kiviaineksille on ominaista puristusjännityksessä hyvin pieni muodonmuutos ennen murtumista. Haurailta kivillä murtuminen

tapahtuu ilman plastista deformaatiota. Sitkeillä kiviainek-
silla on puolestaan selvästi suurempi muodonmuutos ennen mur-
tumista ja muodonmuutos tapahtuu lähes plastisesti /24,38/.

Sitkeiden kivien kimmoisuus ja elastisuus johtuu pääasiassa
joustavien, usein asultaan kuitumaisten, sälömaisten tai suo-
mumaisten mineraalien (mm. amfiboli-, serpentiini-, pyroksee-
ni- ja kiillemineraalit) esiintymisestä kivessä. Sitkeät ki-
viainekset ovat kuitenkin yleensä myös pehmeitä, joten ne ei-
vät kestä erityisen hyvin raapivaa kulutusta. Kiven hauraus-
tai sitkeysominaisuus johtuu mineraalikoostumuksen lisäksi
myös kiven tekstuuritekijöistä kuten mineraalien raakoosta,
raemuodosta, suuntautuneisuudesta, rymittymisestä sekä kuor-
mitusolosuhteista.

Rakennusgeologinen kallioluokitus jakaa kiviainekset karkeas-
ti eri mineraalien määräsuhteiden perusteella taulukon 2 mu-
kaisesti pehmeisiin, hauraisiin, sitkeisiin tai koviin kivi-
laatuihin.

Taulukko 2. Rakennusgeologisen kallioluokituksen mineraali-
koostumuksen mukainen kivilaatu /22/.

Kivilaadun nimitys	Vallitsevien mineraalien likimääräinen osuus
pehmeä	kiilteet, talkki, kloriitti, karbonaatit yli 40 %
hauras	maasälvät yli 40 %, amfibolit ja pyrokseenit yht. alle 25 %
sitkeä	amfibolit ja pyrokseenit yht. vähintään 25 %
kova	kvartsia yli 40 %

Kovina kivilajeina pidetään yleensä mm. kvartsiittia, lep-
tiittiä ja pääosin kvartsi-maasälpämineraaleista koostuvia
liuskeita ja gneissejä. Hauraina kivilajeina pidetään mm.
pegmatiitteja, rapakiviä ja usein graniitteja sekä kiillemi-
neraaleja vähän sisältäviä karkearakeisia gneissejä. Sitkeinä

kivilajeina pidetään puolestaan amfiboliittia, gabraa, peridotia, diabaasia sekä usein kiilleliusketta. Pehmeitä kivilajeja ovat mm. kalkkikivi, usein fylliitti sekä erilaiset talkki-, serpentiini-, kiille- ja kloriittiliuskeet.

Teiden päällystemateriaaleiksi soveltuvia hieman elastisia muunoksia esiintyy kiven rakenteelliset tekijät huomioon ottaen hyvin monissa kivilajeissa. Niinpä päällystekiviaineksiksi soveltuvia kiviaineksia on mineraalikoostumuksen perusteella saatavissa mm. graniiteista, granodioriiteista, dioriiteista, gabroista, amfiboliiteista, diabaaseista, erilaisista gneisseistä jopa rapakivistä sekä kvartsiiteista. Eriytyisen pehmeät kivilajit eivät kuitenkaan huonosta raaputuskestävyydestään johtuen sovellu tiepäällystekiviaineksiksi.

6.2 Mineraalien raekoko

Mineraalikoostumuksen ohella mineraalien raekoko vaikuttaa ratkaisevasti kiviaineksen lujuuteen ja kulutuskestävyyteen.

Koska suurista mineraaleista koostuvilla kiviaineksilla yksittäisien mineraalirakeiden väliset kitka- ja koheesiopinnat ja näin ollen myös kitka- ja koheesiovoimat ovat pienempiä kuin kooltaan pienistä mineraaleista koostuvilla kiviaineksilla, ovat karkearakeiset kiviainekset lujuudeltaan heikompia kuin hienorakeiset kiviainekset /35/.

Eriytyisen selvästi mineraalien raekoon merkitys tulee esille kooltaan pienissä, esimerkiksi tiepäällysteissä käytettävissä kivirakeissa. Kooltaan pienet (maksimiraekoko 16-32 mm) kivirakeet, jotka ovat murskattu mineraalikooltaan suurirakeisesta kiviaineksesta, koostuvat vain muutamista harvoista mineraaleista. Tällöin yksittäiset kiviainestekijät, kuten kiille- ja maasälpämineraalien helppo lohkeavuus sekä mineraalien heikko yhteenliittyminen voivat ratkaisevasti heikentää kivirakeen lujuutta /23/. Sitä vastoin lukuisista, kooltaan pienistä mineraaleista koostuvissa kivirakeissa yksittäiset kiviainestekijät eivät merkittävästi vaikuta koko kivirakeen lujuuteen. Kooltaan pienistä mineraaleista koostuvien kivira-

keiden lujuuteen ja kulutuskestävyyteen vaikuttaa lähinnä koko kivirakeen mineraalikoostumus, mineraalien keskinäinen sijainti, mineraalien liittyminen toisiinsa, suuntautuneisuus, raot ja kivirakeen muoto.

Mineraalien raekoko vaikuttaa kiviaineksen lujuuden ohella myös murskauksessa saatavan kiviaineksen rakeisuuteen. Lujista, tiiveistä, hienorakeisista kiviaineksista muodostuu murskauksessa paljon hienoja lajitteita, sillä kivi rikkoutuu helposti monomineraaliasteelle, mutta tätä hienommaksi huomattavasti vaikeammin. Murskaustuotteen rakeisuuteen vaikuttaa mineraalien raekoon lisäksi myös kiven rakenne, murskaimen tyyppi ja sen asetus.

6.3 Mineraalien lohkeavuus ja muoto

Mineraalien erilaisen kovuuden lisäksi eri mineraaleilla on toisistaan poikkeava lohkeavuus eli taipumus rikkoutuessaan muodostaa yleensä tasaisia lohkopintoja. Lohkopinta tai -pinnat määräytyvät kunkin mineraalin sisäisen hilarakenteen (= alkuaineiden tai -yhdisteiden järjestynyt ryhmittymä) mukaisesti. Mineraalin lohkopinnat ovat hyvin kehittyneissä mineraalikiteissä yleensä jonkun kidepinnan suuntaisia. On olemassa myös mineraaleja, joilla ei esiinny laisinkaan lohkeavuutta. Tällaiset mineraalit muodostavat rikkoutuessaan epäsäännöllisiä murrospintoja. Yleisin mineraali, joilla ei esiinny lohkeavuutta on kvartsi. Mineraalit voivat kuitenkin rikkoutuessaan muodostaa myös epäsäännöllisiä murrospintoja, vaikka niillä olisikin hyvä lohkeavuus /37/. Mineraalien toisistaan poikkeava lohkeavuus riippuu mineraalin hilarakenteesta sekä mineraalin rakenneyksiköiden välisistä sidosvoimista /7/.

Mineraalilla voi olla lohkeamisherkkyuden mukaan hyvä, selvä tai huono lohkeavuus. Jos mineraali lohkeaa tietyssä tai tietyissä suunnissa erittäin helposti, sanotaan mineraalilla olevan hyvä eli etevä lohkeavuus. Päinvastaisessa tapauksessa mineraalilla sanotaan olevan huono lohkeavuus /7/.

Mineraalien lohkeavuus vaikuttaa mineraalien lujuuteen siten, että etenkin etevän lohkeavuuden omaavilla mineraaleilla on erilainen lujuus mineraalin eri suunnissa. Kivissä harvoja eteviä lohkeavuussuuntia omaavat mineraalit heikentävät pieniä kivirakeita sitä enemmän, mitä suurempia nämä mineraalit ovat tai mitä yhdenmukaisemmin nämä mineraalit ovat kivessä suuntautuneet /21,22/.

Taulukossa 3 on esitetty eräiden maassamme yleisesti esiintyvien mineraalien lohkeavuuksia.

Taulukko 3. Eräiden yleisimpien mineraalien lohkeavuus ja Mohsin asteikon mukainen raapaisukovuus /34,37/.

	Lohkeavuus	Mohsin kovuus
Kvartsi	ei lohkeavuutta, murtuu epämääräisin murrospinnoin	7
Plagioklaasit	hyvä lohkeavuus kahdessa toisiaan vastaan lähes kohtisuorassa suunnassa	6
Kalimaasälvät	hyvä lohkeavuus kahdessa toisiaan vastaan kohti- suorassa olevassa suunnassa	6
Kiilteet	hyvä lohkeavuus lehtimäisten suomujen suunnassa	2,5-3
Kloriitti	hyvä lohkeavuus suomujen suunnassa	2-3
Kipsi	hyvä lohkeavuus yhdessä suunnassa	1,5-2
Talkki	hyvä lohkeavuus yhdessä suunnassa	1
Amfibolit (sarvivälke)	hyvä lohkeavuus, lohkorako- jen välinen kulma noin 120°	5-6
Pyrokseenit (augiitti)	hyvä lohkeavuus, lohkorako- jen välinen kulma noin 90°	5,5-6
Oliviini	huono lohkeavuus, murtuu simpukkamaisin murrospinnoin	6,5-7

Granaatit (almandiini)	huono lohkeavuus, murtuu epämääräisin murrospinnoin	6,5-7,5
Serpentiini	murtuu epämääräisin murrospinnoin	3-4
Kalsiitti	selvä lohkeavuus kolmessa lähes kohtisuorassa olevassa suunnassa	3
Dolomiitti	hyvä lohkeavuus, murtuu epä-säännöllisin murrospinnoin	3,5-4
Apatiitti	huono lohkeavuus, murtuu epä-säännöllisin murrospinnoin	5
Epidootti	hyvä lohkeavuus kahdessa suunnassa, murtuu epäsäännöllisin murrospinnoin	6-7
Diopsidi	hyvä lohkeavuus, murtuu epä-säännöllisin murrospinnoin	5-6
Staurolitti	hyvä lohkeavuus, murtuu epä-säännöllisin murrospinnoin	7-7,5
Andalusiitti	huono lohkeavuus, murtuu epä-säännöllisin murrospinnoin	7,5
Rikkikiisu	huono lohkeavuus, murtuu epä-säännöllisin murrospinnoin	6-6,5
Magnetiitti	huono lohkeavuus, murtuu epä-säännöllisin murrospinnoin	5,5
Kuparikiisu	hyvä lohkeavuus, murtuu epä-säännöllisin murrospinnoin	3,5-4
Magneettikiisu	hyvä lohkeavuus, murtuu epä-säännöllisin murrospinnoin	4

Mineraalien raemuoto vaikuttaa kiven lujuuteen ja kulutuskestävyyteen siten, että pääosin omamuotoisista eli yleensä suorilla raerajoilla toisiinsa liittyneistä mineraaleista koostuvat kiviainekset ovat lujuudeltaan heikompia kuin epämääräisen muotoisista mineraaleista koostuvat kiviainekset /22,35/. Runsaasti omamuotoisia, suorilla raerajoilla toisiinsa liittyneistä mineraaleista koostuneita kiviaineksia kutsutaan usein löyhärakenteisiksi tai rakeistuneiksi kiviain-

neksiksi /24/. Kiven löyhärakenteisuutta aiheuttaa mineraalien omamuotoisuuden lisäksi kovien mineraalien esiintyminen kivessä säännöllisesti pehmeämpien esimerkiksi kiillemineraalien ympäröiminä.

6.4 Mineraalien suuntautuneisuus.

Kiviaineksen suuntautuneisuus riippuu kiviaineksen muodostavien mineraalien keskinäisestä järjestymisestä. Mineraalit voivat esiintyä kivessä suuntautumattomista täysin yhdenmukaisesti suuntautuneisiin mineraaleihin. Selvimmin mineraalien yhdenmukainen suuntautuneisuus ilmenee erilaisissa liuskeissa. Mineraalien yhtenmukaista suuntautuneisuutta lievempiä muotoja ovat nk. pilsteisyys ja juoksurakenne, joissa mineraalit eivät ole järjestyneet niin yhdenmukaisesti kuin liuskeissa. Pilsteisyys esiintyy usein erilaisissa syväkivissä ja juoksurakenne pinta- eli vulkaanisissa kivilajeissa. Metamorfoitumattomat tai vain heikosti metamorfoituneet syväkivet ovat yleensä etenkin massiivin keskiosissa suuntautumattomia tai vain heikosti suuntautuneita.

Rakennusgeologisen kallioluokituksen mukaisesti kivilaadut jaetaan liuskeisuusasteen mukaisesti suuntauksettomiin, heikosti, kohtalaisesti tai voimakkaasti liuskeisiin kiviin /12/.

Geologisesti määritettynä liuskeisuus on tasosuure ja se ilmenee tyypillisesti levymäisten tai pitkänomaisten mineraalien tasomaisena yhdensuuntaisuutena. Liuskeisuus ilmenee kivessä lisäksi mineraalirakeiden rajapintojen yhdensuuntaisuutena, tiheään toistuvina yhdensuuntaisina epäjatkuvuuksina kuten pieninä siirroksina ja murtumina sekä kiven raekoon tai koostumuksen kerrosmaisina vaihteluina /10/.

Liuskeisuuden lisäksi mineraalien yhdenmukainen suuntaus ilmenee lineaationa eli viivauksena. Viivaus on esimerkiksi säilömaisten rakeiden liuskeisuusostasolla havaittava yhdenmukainen viivasuunta. Lineaatio on viivasuure ja se ilmenee mm.

mineraalien tai mineraalikasautumien kasvamisena tiettyyn suuntaan, kivessä olevien kappaleiden (lohkareet, heitteleet, katkeilleet juonet, kerrokset jne.) venyminä, puikkomaisien mineraalien yhdensuuntaisuutena sekä poimuakseleina /10/.

Mineraalien suuntautuneisuus vaikuttaa koko kiven ja erikokoisesti kooltaan pienien kivi-kappaleiden lujuuteen siten, että suuntautuneet kiviainekset ovat tietyissä suunnissa heikompia kuin vastaavan mineraalikoostumuksen omaavat suuntautumattomat kiviainekset. Suuntautuneiden kivien heikompi lujuus johtuu siitä, että yhdenmukaisesti suuntautuneiden mineraalien heikkoussuunnat ovat lähes samat. Tällöin mineraalien yhdenmukainen suunta muodostaa kiveen heikkoustason /21/. Suuntautuneen kiven lujuus voi olla heikoimmassa suunnassaan vain 10...25 % vahvimmassa suunnasta mitatusta lujuusarvosta /24/. Suuntautuneilla kiviaineksilla kiven lujuus riippuu anisotropiatason ja rasitusvoiman välisestä kulmasta. Esimerkiksi pienin murtolujuusarvo saadaan puristettaessa kiveä liuskeisuutta (= anisotropiataso) vastaan vinossa (40° - 60°) suunnassa /35/.

Suuntautuneilla kivillä maksimipuristusmurtolujuus on liuskeisuuden suunnassa likipitään sama tai hiukan suurempi kuin liuskeisuutta vastaan kohtisuorassa olevassa suunnassa. Veto-murtolujuuden suhteen kivi on heikointa vedon tapahtuessa liuskeisuutta vastaan kohtisuorassa olevassa suunnassa.

Mineraalien suuntautuneisuuden kannalta lujimpia kiviä ovat suuntautumattomat tai vain heikosti suuntautuneet kivet. Eri-tyisen lujan rakenteen muodostavat raemuodoltaan ja -kooltaan toisistaan hieman poikkeavat suuntautumattomat mineraalit, jotka sijaitsevat kiviaineksessa tasaisesti toistensa lomissa.

Kiviaineksen suuntautuneisuus vaikuttaa kiven eri suunnissa ilmenevän erilaisen rikkoutumisherkkyuden lisäksi myös murs-

kauksessa syntyvän kivirakeen muotoon. Murskattaessa voimakkaasti suuntautuneita kiviaineksia muodostuu puikkomaisempia tai laattamaisempia kivirakeita kuin murskattaessa homogeenisiä, suuntautumattomia kiviaineksia /35/.

6.5 Mineraalien ryhmittyminen

Mineraalien suuntautuneisuuden lisäksi kiven lujuuteen vaikuttaa mineraalien keskinäinen sijainti ja ryhmittyminen. Raekooltaan tai fysikaalisilta ominaisuuksiltaan kuten kovuudeltaan ja lohkeavuudeltaan toisistaan poikkeavat mineraalit voivat ryhminä ja vyöhykkeinä muodostaa kiveen heikkouskohtia, joista kivi rasituksessa helpoiten rikkoutuu. Sitä vastoin harvat toisistaan erillään olevat kiven lujuuden kannalta heikot mineraalit eivät merkittävästi heikennä kiveä /44/. Mineraalien keskinäisen ryhmittymisen merkitys kiven lujuuteen ilmenee selvästi mm. kiillegneississä olevissa kivirakeissa, joissa juovamaiset kiillekasaumat muodostavat kiveen rikkoutumisalttiita kohtia.

Mm. mineraalien keskinäisen ryhmittymisen suhteen kivet voidaan jakaa tasalaatuisiin eli homogeenisiin tai vaihteleviin eli heterogeenisiin kiviin. Homogeenisissä kivissä eri mineraaleja esiintyy tasaisesti koko kivessä eikä mineraalien raekoossa esiinny suuria vaihteluja. Heterogeenisissä kivissä mineraalikoostumus ja teksturitekijät vaihtelevat hyvinkin paljon. Homogeenisissä, massamaisissa kivissä kiven eri ominaisuudet ovat eri suunnissa lähes samanlaiset, kun taas heterogeenisissä kivissä ominaisuudet voivat olla hyvinkin erilaiset kiven eri suunnissa. Mineraalien ryhmittymisen suhteen lujimpia ovat homogeeniset kiviainekset, joissa eri mineraalit esiintyvät tasaisesti toistensa joukossa.

6.6 Kiven rikkonaisuus

Kiviaineksen rikkonaisuus ilmenee kivessä tavallista runsaampana rakojen ja mikrorakojen määränä sekä kiven rapautuneisuutena /22/. Kallioperässä esiintyvät raot ovat suoria tai

vaihtelevan suuntaisia kallioa jakavia pintoja, jotka yhdessä muodostavat kallioon enemmän tai vähemmän säännöllisen rakoiluverkoston. Erilaisia rakoiluverkostoja kutsutaan yhteisnimellä rakoilu.

Rakoilu on syntynyt kun kalliooperän veto- tai leikkausjännitykset ovat ylittäneet kallion lujuuden.

Kallio on rikkoutunut pääasiassa voimakkaissa kalliooperän liikunnoissa. Liikunnoissa kallio on ruhjoutunut, murtunut ja hiertynyt muodostaen vaihtelevan levyisiä heikkousvyöhykkeitä. Rikkonaista kallioa luonnehtivat tiheään rakoilun lisäksi usein pienet siirrokset sekä haarniskapintaiset tai savimaisella mineraaliaineksella täyttyneet raot /22/.

Rikkonaisen kallion vyöhykkeisiin liittyy usein niiden ympäristöönkin ulottuvaa voimakasta rapautumista, sillä kallion rikkonaisuus on luonut suotuisat edellytykset myös kiviaineksen kemialliselle ja mekaaniselle rapautumiselle.

Kiven rikkonaisuutta ei aina voida havaita kallioista tai kivinäytteestä silmämääräisesti, vaan rikkonaisuuden toteamiseksi tarvitaan usein tarkempia esimerkiksi mikroskooppitutkimuksia.

Kiviaineksen lujuuteen ja kulutuskestävyyteen kiviaineksen rikkonaisuus vaikuttaa merkittävästi, sillä kuormitettaessa rakoja tai mikrorakoja sisältävää kivikappaletta kivi murtuu tai lohkeaa hyvin helposti rakojen mukaisesti. Rakoillut kiviaines rikkoutuu yleensä rakoja pitkin jo kiven irroitus- tai murskausvaiheessa, mutta runsaasti mikrorakoja sisältävässä kiviaineksessa mikrorakoja voi esiintyä vielä murskattussakin kiviaineksessa.

6.7 Kiven rapautuneisuus

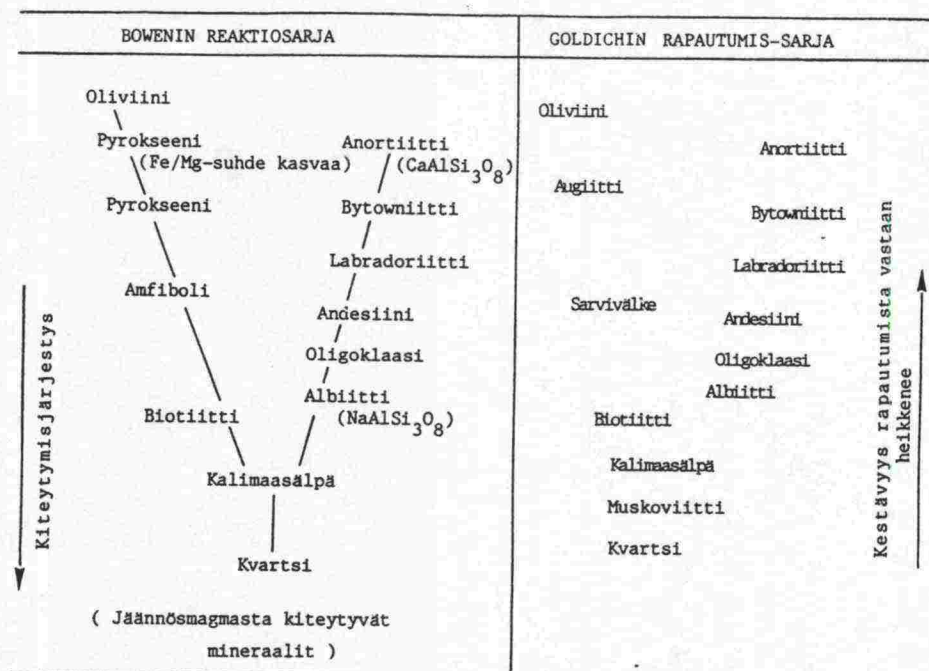
Kiviaineksen rapautuminen heikentää kiven lujuutta, sillä rapautuessaan kiven rakenne löyhtyy, mineraalit muuttuvat toisiksi mineraaleiksi sekä kivistä liukenee vähitellen helposti liukenevia alkuaineita ja mineraaleja. Rapautuessaan kivi muuttuu lopulta löyhäksi mineraalimaaksi /22,41/.

Kiven rapautuminen tapahtuu sekä mekaanisesti että kemiallisesti. Mekaaninen rapautuminen on kiven ja mineraalien mekaanista särkymistä. Kemiallinen rapautuminen käsittää kaikki kemialliset reaktiot kiviaineksen, ilmakehän ja veden välillä /41/.

Kiven rapautuessa osa tai kaikki sen mineraaleista muuttuvat toisiksi, kullekin mineraalille ominaisiksi muuttumistuloksen mineraaleiksi. Rapautumisen jatkuessa nämä mineraalit voivat muuttua vielä edelleen. Kiven kemiallisesti rapautuessa siihen jää jäljelle rapautumista kestäviä mineraaleja kuten kvartsia ja kalimaasälpää, rapautumistuloksia (muuttuneita mineraaleja) sekä rapautuvasta kivistä liuenneita aineita.

Kaikki mineraalit eivät rapaudu yhtä herkästi, vaan niillä on toisistaan hyvinkin poikkeava rapautumisherkkyyys. Yleistäen mineraalien rapautumisherkkyyys noudattaa Bowenin esittämää mineraalien kiteytymisjärjestystä (kuva 5). Sen mukaan esimerkiksi oliviini, pyrokseenit ja kalsiumrikas plagioklaasi (anortiitti), jotka kiteytyvät kiteytymisjärjestyksen varhaisessa vaiheessa, rapautuvat herkästi. Sitä vastoin kalimaasälpä, muskoviitti ja kvartsi, jotka kiteytyvät kiteytymisjärjestyksen loppuvaiheessa, kestävät rapautumista hyvin /41/.

Kuva 5. Bowenin esittämä kiteytymis-sarja ja Goldichin esittämä rapautumissarja /29/.



Tavallisien Suomessa esiintyvien kivilajien päämineraaleista oliiviini on kaikkein herkin kemiallisille muutoksille. Oliiviinia seuraa tummista mineraaleista hypersteeni, augiitti, sarvivälke ja biotiitti. Vaaleista mineraaleista kaikkein rapautumisherkin on anortiitti. Anortiittia seuraavat muut plagioklaasimineraalit bytowniitti, labradori, andesiini, oligoklaasi ja albiitti sekä kalimaasälpä. Kalimaasälvistä mikrokliini on yleensä kestävämpää kuin ortoklaasi. Näitä mineraaleja kestävämpiä ovat muskoviitti ja kvartsi /41/. Vaikka kvartsi on kemiallisille muutoksille yksi kestävimmistä mineraaleista liukenee se fluorivetyhappoon (H_2F_2) /34/. Erityisen herkkiä kemialliselle rapautumiselle ovat kaikki sulfidimineraalit kuten rikkikiisu, magneettikiisu, kupari-kiisu, sinkkivälke, lyijyhohde jne. Kivet, joissa sulfidimineraalit esiintyvät hienona, tasaisena pirotteena rapautuvat herkemmin kuin kivet, joissa sulfidimineraalit esiintyvät harvoina, suurempina rakeina.

Mineraalien rapautumisherakkyys voi vaihdella edellä mainitusta rapautumisjärjestyksestä huomattavasti, sillä rapautumiseen vaikuttaa myös mineraalien raekoko, mineraalien yhteenliittyminen, lämpölaajenemisen keskinäiset erot, lohkeavuus ja kiven rikkonaisuus sekä rapautumisprosessit, joihin kivi joutuu.

Rakennusgeologinen kallioluokitus jakaa kiviainekset rapautuneisuuden mukaan rapautumattomaan (Rp0), vähän rapautuneeseen (Rp1), runsaasti rapautuneeseen (Rp2) ja täysin rapautuneeseen (Rp3) kivilaatuun. Taulukossa 4 on esitetty yleisimmät tunnistamispiirteet kiven rakennusgeologisen kallioluokituksen mukaisille rapautumis/muuttumisasteille.

Taulukko 4. Rakennusgeologisen kallioluokituksen mukaiset kiven rapautuneisuusluokat /22/.

Nimitys	Tunnus	Määrittäysperusteet
Rapautumaton	Rp 0	Kiviaines on tervettä. Mineraalit ovat muuttumattomia tai muuttumistuloksia on merkityksettömän vähän. Mineraalit ovat lujasti kiinni toisissaan. Murtopinnan väri riippuu kivilajin päämineraaleille ominaisista väreistä.
Vähän rapautunut	Rp 1	Kiviaines on osittain muuttunutta. Helpoimmin rapautuvissa mineraaleissa (mm. kiilteissä ja maasälviissä) on havaittavissa muuttumistuloksina värinsamentumista. Tumma kiille on usein muuttunut vihreäksi kloriitiksi ja maasälpä hienorakeiseksi vaaleaksi kiilteeksi. Muuttumisen johdosta mineraalien väliset sidokset ovat heikentyneet. Murtopinnoilla mineraalien väri on vaihtelevan samaa.
Runsaasti rapautunut	Rp 2	Kiviaines on enimmäkseen helposti murenevaa ja löyhää. Helposti rapautuvat mineraalit ovat yleensä täysin muuttuneita tai poisliuenneita (kalsiitti). Kvartsi- ja kalimaasälpäpitoisissa kivilaaduissa mineraalit saattavat olla jokseenkin muuttumattomia, mutta mineraalit ovat löyhästi kiinni toisissaan (rapakiven moro). Murtopinnoilla mineraalit ovat vaihtelevan kirjavia tai himmeitä.
Täysin rapautunut	Rp 3	Kiviaines on rapautunutta, täysin löyhää savimaista massaa (kalliosavea). Tämä sisältää pääasiassa savimineraaleja sekä mekaanisesti hienontunutta kvartsia. Pehmeässä saviaineksessa saattaa kuitenkin olla kovia teräväsärmäisiä kivenkappaleita.

7. TIEPÄÄLLYSTEKIVIAINEKSEN LUJUUDEN JA KULUTUSKESTÄVYYDEN MÄÄRITTÄMINEN

Kiven lujuus ja kulutuskestävyys voidaan määrittää lukuisilla toisistaan poikkeavilla menetelmillä. Yleensä lujuus ilmoitetaan jonkin kalliomekaanisen lujuusparametrin avulla tai porattavuusominaisuutena. Kulutuskestävyys ilmoitetaan puolestaan jonkun kulutuskokeen tuloksena.

Tässä tutkimuksessa koemateriaalina olevien kiviaineksien lujuus ja kulutuskestävyys on määritetty kalliomekaanisten lujuusparametrien lisäksi TVH:n käyttämällä kiviaineksen laatuokitusmenetelmillä sekä harvemmin käytetyillä porattavuustutkimuksilla sekä Tröger- ja ns. poranäytteiden kulutuskokeilla. Seuraavassa on esitetty tarkemmin käytettyjä koemenetelmiä ja -laitteita.

7.1 Kulutuskokeet

7.1.1 Los Angeles-koe

Alkujaan amerikkalainen Los Angeles-koe testaa kiviaineksen isku- ja kulutuskestävyyttä /1,20/. Kokeessa pyörivässä, kooltaan 51 cm pitkässä ja halkaisijaltaan 71 cm hyllyllä varustetussa terässylinterissä olevat kivirakeet kuluvat hankautuessaan toisiaan, terässylinterin seinämiä sekä teräskuulia vasten. Hankauksen lisäksi kiviainekseen kohdistuu putoavien teräskuulien ja kivirakeiden aiheuttamia iskuja. Los Angeles-koe voidaan suorittaa käyttämällä eri karkeuden omaavia kivifraktioita. Suomessa Los Angeles-kokeessa käytetään ns. B-asteitusta, jossa kokeessa käytettävien kivirakeiden koko on 9,5-19 mm. Kyseistä fraktiota laitetaan terässylinteriin yhteensä 5 kg (2,5 kg 9,5-12,7 mm:n ja 2,5 kg 12,7-19 mm:n fraktiota) yhdessä yhdentoista yhteispainoltaan 4.584 ± 25 grammaa painavien teräskuulien kanssa. Terässylinterin 500 kierroksen jälkeen kiviaines seulotaan ja punnitaan. Kokeen tulos ilmoitetaan ns. Los Angeles-lukuna, joka saadaan 1,68 mm:n seulan läpäisseen kiviaineksen määrä painoprosentteina alkuperäisen näytteen määrästä.

Kiviaineksen kulutuskestävyyden katsotaan olevan sitä parempi, mitä pienempi Los Angeles-luku on. Los Angeles-kokeessa menestyvät usein lujien, kovien kivien lisäksi pehmeät ja sitkeät kiviainekset.

Los Angeles-koetta pidetään luotettavana laboratoriomenetelmänä hyvän toistettavuutensa ja tuloksien pienen hajonnan ansiosta. VTT:n tie- ja liikennelaboratorion tekemien tarkkuus- ja toistettavuuskokeiden mukaan saman tekijän rinnakkaisnäytteiden tuloksien keskihajonta on noin 2 % ja eri laboratorioissa tehtyjen rinnakkaisnäytteiden tuloksien keskihajonta noin 4,5 % tuloksien keskiarvosta /20/.

Suomessa Los Angeles-koetta on viime vuosiin saakka pidetty päällystekiviaineksien ensisijaisena lujuuden määrittämenetelmänä. Muissa Pohjoismaissa Los Angeles-koetta ei käytetä teiden päällystekiviaineksien laatuluokitusmenetelmänä.

7.1.2 Haurausarvokoe

Ruotsissa kehitetyllä haurausarvokokeella testataan kiviaineksen iskunkestävyyttä /20/. Kokeen katsotaan tietyllä tavalla jäljittelevän liikenteen aiheuttamia äkillisiä iskuja tien rakennusmateriaalina käytettävään kiviainekseen.

Haurausarvokokeessa 8-12 mm olevaa murskattua kiviainesfraktiota laitetaan noin 500 g (näytemäärä = $\delta / 2,65 \text{ g/cm}^3$. 500 g, missä δ = tutkittavan kiviaineksen kiintotiheys) sisähalkaisijaltaan ja korkeudeltaan 100 mm olevaan terässylinteriin. Kivirakeiden päälle asetetaan sylinteriin sopiva 3,7 kg painava teräsmäntä, jonka päälle pudotetaan 20 kertaa 25 cm:n korkeudelta 14 kg painava pudotusvasara.

Suomessa haurausarvo ilmoitetaan yleensä ns. parannettuna haurausarvona, joka on kokeessa raekooltaan 4 mm hienommaksi murskaantuneen aineksen määrä painoprosentteina näytteen alkuperäisestä määrästä.

Kiviaineksen lujuuden katsotaan Los Angeles-kokeen tavoin olevan sitä parempi, mitä pienempi kivinäytteen parannettu haurausarvo on. Kokeessa sitkeät ja pehmeät kiviainekset saavat usein hyvän haurausarvon. Lisäksi pitkulaiset kivirakeet rikkoutuvat kokeessa tasamittaisia kivirakeita helpommin.

Haurausarvokoetta pidetään Los Angeles-kokeen tavoin hyvän tarkkuutensa ansiosta hyvänä koemenetelmänä. Haurausarvokokeen tuloksien tarkkuuden on todettu saman tekijän rinnakkaiskokeissa olevan noin 1 % kokeiden keskiarvosta. Eri laboratorioissa suoritettuina tuloksien on todettu poikkeavan noin 2 % rinnakkaisnäytteiden keskiarvosta /20/. TVH:n laboratoriossa syksyllä 1986 tehtyjen haurausarvotutkimuksien perusteella menetelmän tarkkuus ei kuitenkaan ole näin hyvä, vaan rinnakkaisnäytteiden tulokset saattavat poiketa kiviaineksesta riippuen 5 % jopa 10 % keskiarvosta.

Haurausarvokoe on ollut jo useiden vuosien ajan kaikissa Pohjoismaissa keskeinen teiden päällystekiviaineksien laatuluokitusmenetelmä.

7.1.3 Hioutuvuuskoe

Hioutuvuuskoe on kiviaineksen kulutuskestävyyskoe, jolla testataan kiviaineksen kykyä vastustaa tasaista hioviaa kulutusta /3,20/.

Hioutuvuuskokeen tulos ilmoitetaan ns. hioutuvuuslukuna, joka tässä tutkimuksessa on määritetty hieman muutetun ruotsalaisen menetelmän (MBB 31-86 /9/) mukaisesti. Sen mukaan rae-kooltaan 9,52-12 mm (Ruotsissa 8-11,2 mm) olevasta murskatus- ta kivirae-fraktiosta valmistetaan liima-aineksella iskostamalla kaksi kooltaan 90 mm x 90 mm (Ruotsissa 85 mm x 85 mm) olevaa näytelevyä, jossa kummassakin on 36 toisistaan hieman erillään olevaa kivirae- tta. Näytettä hiotaan yhdessä rinnakkaisnäytteen kanssa vaakatasossa 28-30 kierrosta/minuutissa pyörivää halkaisijaltaan noin 615 mm olevaa hiontalevyä (teräslaatu SIS 141305 tai vastaava) vasten. Näytelevyissä

ottaa hiontalevyyn kiinni vain näytelevystä ulkonevat kivirakeet. Hionnan aikana näytelevyjä kuormitetaan 2500 ± 1 gramman painoilla. Kummankin näytelevyn eteen valutetaan tassaisesti 70 ± 5 grammaa/minuutti vakiokarkeuden omaavaa hiontajauhetta (Alodur 60, Durubit 60 tai vastaava). Näytelevyjä hiotaan 500 kierroksen ajan. 250 kierroksen jälkeen molempia näytelevyjä käännetään hiontasuunnassa 180° .

Hioutuvuusluku ilmoitetaan kokeessa poiskuluneen kiviaineksen tilavuutena, joka saadaan kuluneen kiviaineksen grammamäärä jaettuna ko. kiviaineksen kiintotiheydellä. Näytteen ja sen rinnakkaisnäytteen tulokset eivät saa poiketa keskiarvosta 15 %:ia enempää.

Hioutuvuusmenetelmä on osoittautunut melko tarkaksi tutkimusmenetelmäksi. Ruotsalaisen eri hioutuvuuslaitteilla suoritetun rinnakkaistutkimuksen (6 kiviainesta, 8 laboratoriota) mukaan tulokset poikkeavat alle 10 % keskiarvosta /17/.

Kiviaineksen kovuuden ja kulutuskestävyyden katsotaan olevan sitä parempi, mitä pienempi hioutuvuusluku on. Kokeessa menestyvät lujasti toisiinsa kiinnittyneistä kovista mineraaleista koostuvat kiviainekset.

Hioutuvuuskokeen tuloksien on todettu olevan riippuvaisia koelämpötilasta ja ilman kosteudesta, joten laitteistoa tulisi käyttää vain tiloissa, missä nämä vaihtelut ovat hallittavissa /16/.

Koelämpötilaa ja -kosteutta enemmän kokeen tuloksiin vaikuttaa hiontajauheen kovuus. Käytettäessä hiontajauheena kovaa jauhetta (esim. piikarbidijauhetta) tulokset ovat huomattavasti (30-40 %) suurempia kuin käytettäessä vastaavan raekoon omaavaa pehmeämpää hiontajauhetta (esim. eräät alumiinioksidijauheet). Tästä johtuen kaikissa menetelmän mukaisissa hioutuvuuslaitteissa tulee käyttää juuri samanlaista hiontajauhetta. Hioutuvuuslukuun vaikuttaa myös näytteen valmistus,

sillä kivirakeet joudutaan valitsemaan ja asettelemaan näytemuottiin yksitellen. Näytelevyissä hiottavien kivirakeiden kulutuspinnan tulee olla kivirakeiden muodosta riippumatta samansuuruinen.

Tässä tutkimuksessa hiontajauheena käytettiin punertavaa Alodur Korn 60-hiontajauhetta. Kokeita suoritettaessa koehuoneen lämpötila oli noin $+21^{\circ}\text{C}$ ja ilman suhteellinen kosteus oli noin 50 %.

Suomessa kiviaineksen hioutuvuuden määrittämismenetelmää ei käytetä kuin erikoistutkimuksissa. Menetelmä ei kuulu myöskään TVH:n normaalisti suorittamiin kiviaineksien laatuluokitusmenetelmiin.

Muissa Pohjoismaissa Ruotsissa ja Norjassa hioutuvuusmenetelmää on käytetty teiden päällystemateriaalien koemenetelmänä jo useiden vuosien ajan.

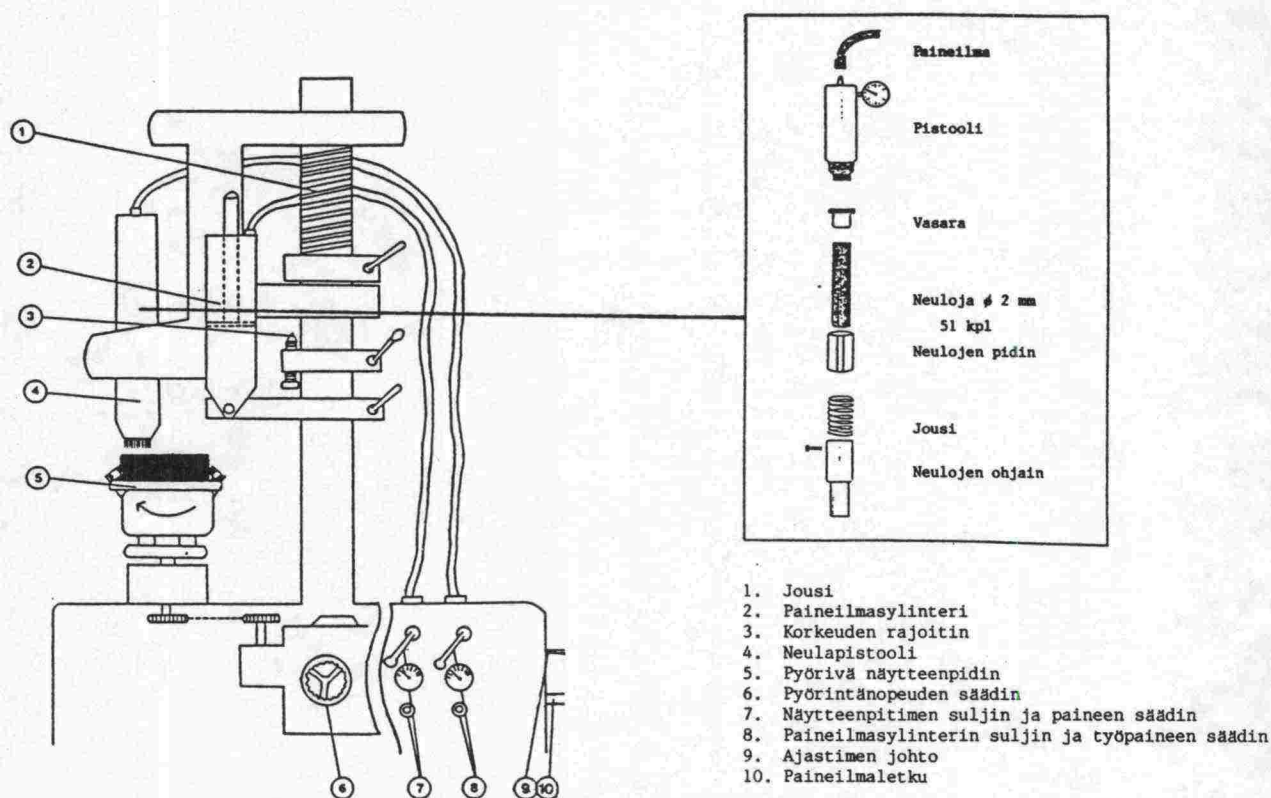
7.1.4 Tröger-kulutuskoe

Länsi-Saksassa kehitetyllä Tröger-laitteella tutkitaan erikoisesti asfalttimassasta valmistettujen koekappaleiden kulutuskestävyyttä, mutta sillä voidaan tutkia myös kiinteitä kivinäytteitä. Koska laitteella ammutaan ilmanpaineella koltisuoraan vaakatasossa akselinsa ympäri pyörivän näytteen pintaan kovametallineuloja, kohdistuu näytteeseen sekä neulojen iskuja että vähäisessä määrin neulojen raapaisuja. Kulutustapahtumasta johtuen laitteella pystytään ainakin osittain jäljittämään nastarengasliikenteen aiheuttamaa kulutusta.

Koska kulutuskestävyyskokeissa käytettäviä Tröger-laitteita on Suomessa vasta muutamia, eikä laitetta kovin yleisesti tunneta, esitellään laitetta seuraavassa yksityiskohtaisemmin.

Tässä tutkimuksessa käytetty Neste Oy:n Tröger-kulutuslaite koostuu ilmanpaineella toimivasta neulapistoolista, neulapistoolin jalustasta, ilmanpaineella toimivasta näytteen kiinnittimestä, akselinsa ympäri pyörivästä näytteen alustasta sekä kulutuskokeen kestoa säätelevästä ajastinlaitteistosta (kuva 6).

Kuva 6. Piirros Tröger-kulutuslaitteesta /4,13/.



Neste Oy:n neulapistooliossa on tyyppiä VON ARX 2 BG, jossa käytetään 51 kappaletta 2 mm läpimitaltaan ja 180 mm pitkää teräsneulaa. Laitteessa voidaan käyttää myös 1 mm:n ja 3 mm:n läpimittaisia neuloja. Neulojen Vickersin kovuus on 550-590 (vrt. kvartsin kovuus on noin 1060). Pistooliossa on kiinnitetty jalustaansa siten, että sitä voidaan liikuttaa haluttuun asentoon korkeus- ja sivusuunnassa. Pistooliossa laskeutuu ilmanpaineella toimivalla mekanismilla jalustassa olevaa

korkeudensäätörajoitinta vasten niin, että neulat ovat haluttulla etäisyydellä (yleensä 3...6 mm) näytteen tasaiseksi sahatusta pinnasta. Korkeudensäätörajoittimen kiinnitys tapahtuu ruuvikiinnityksellä.

Neulapistoolissa on magneettiventtiili, jonka nopea avautuminen ja sulkeutuminen saa aikaan ilmanpainesykäyksen. Ilmanpainesykäys liikuttaa pistooliosassa olevaa mäntää, joka puolestaan antaa nopean iskun männän edessä oleville neuiloille. Iskun voimasta neulat liikkuvat eteenpäin. Neulapistoolin etuosassa, neuilojen ohjainholkin edessä oleva jäykkä kierrejousi palauttaa ohjainholkin, neulat ja männän yläasentoonsa ja uusi ilmasykäys antaa neuiloille uuden iskun. Neuilojen maksimi iskupituus on noin 30 mm.

Neulakimpun kokonaisiskuvoima 0,6 MPa:n työpaineella alaslaskettujen neuilojen ollessa 6 mm:n etäisyydellä näytteen pinnasta on noin 1900 N ($f = 66,6$ iskua/sek., voimamaksimi 2440 N). Jokaisen neulan lyöntitiheys on keskimäärin 66 iskua/sek. (= 3960 iskua/min.) /13/. Neuilojen iskuvoima ei kokeen aikana ole tasainen, vaan kitkasta ja neuilojen erilaisesta iskupituudesta johtuen se vaihtelee hyvinkin paljon.

Tutkittava sylinterin muotoinen näyte kiinnitetään ilmanpaineella toimivilla puristinatureilla alustaansa, joka pyörii akselinsa ympäri $8 \frac{1}{4}$ - 78 kierrosta/minuutissa.

Kulutuskokeen kestoa voidaan säädellä laitteiston toiminta-aikaa säätelevällä ajastimella.

Pohjoismaissa Tröger-laitteita käytetään rutiininomaisissa päällystetutkimuksissa vain Norjassa (Statens Vegvesen) sekä jonkun verran Ruotsissa (VTI). Norjassa ja Ruotsissa Tröger-laitteella tutkitaan asfalttipäällysteestä porattujen (läpimitta 100 mm) poranäytteiden tai ns. Marshall-koekappaleiden kulutuskestävyyttä.

Norjan tielaitoksessa kahdella Tröger-laitteella tehdyn toistettavuustutkimuksen mukaan asfalttimassasta valmistettujen rinnakkaisnäytteiden (6 kpl) tulokset poikkeavat alle 12 % keskiarvosta /15/.

Neste Oy:n Tröger-laitteella syksyllä 1986 Lemminkäinen Oy:n laboratoriossa betonisilla rinnakkaisnäytteillä (8 kpl) suoritettussa toistettavuustutkimuksessa tulokset poikkesivat maksimissaan 6,6 % keskiarvosta.

Suomessa Tröger-laitteita käytetään asfalttikoekappaleiden tai kivinäytteiden kulutuskestävyyden erikoistutkimuksissa.

Tässä tutkimuksessa kulutettiin Neste Oy:n Tröger-kulutuslaitteella kymmentä kallionäytteestä kairattua kivinäytettä. Koska soramurskeesta ei voitu kairata läpimitaltaan 120 mm olevia kairanäytteitä, ei soramursketta laitteella voitu tutkia.

Jokaisesta liuskeisuutta vastaan lähes kohtisuoraan kairatus-
ta näytteestä sahattiin 20-50 mm paksut kappaleet, joiden päät tasattiin yhdensuuntaisiksi.

Näytteitä pidettiin ennen kulutuskoetta noin 12 tuntia 105°C lämpötilassa. Tämän jälkeen niiden annettiin jäähtyä ja ne punnittiin. Kulutuskoetta varten näytteiden ympärille liimattiin teipistä noin 3 cm korkea reunus, jotta näytteen pinnalle voitiin laittaa kokeen ajaksi vettä.

Jokaista näytettä kulutettiin 20 kolmen minuutin periodia eli yhteensä 60 minuuttia. Kokeen jälkeen näytteet jälleen kuivatettiin 105 °C lämpötilassa ja punnittiin. Jokainen näyte kulutettiin vielä näytteen toiselta puolelta ja lopullinen tulos ilmoitetaan kahden kulutusajon keskiarvona. Kulutuskokeen tulokset ilmoitetaan kokeen aikana pois kuluneen kiviaineksen tilavuutena (cm³).

Kunkin näytteen ensimmäisessä ajossa käytettiin aina uusia neuvoja ja näytteen toiselta puolelta tehdyssä toisessa ajossa käytettiin näitä kerran käytettyjä neuvoja.

Yläasennossaan olevien neuvojen ja näytteen välinen etäisyys säädettiin mittalevyllä ensimmäisessä ajossa 6 mm:ksi ja toisessa ajossa 5 mm:ksi. Pienempi neuvojen ja näytteen välinen etäisyys ilmeni lähes kaikkien näytteiden hieman suurempana kulumisena.

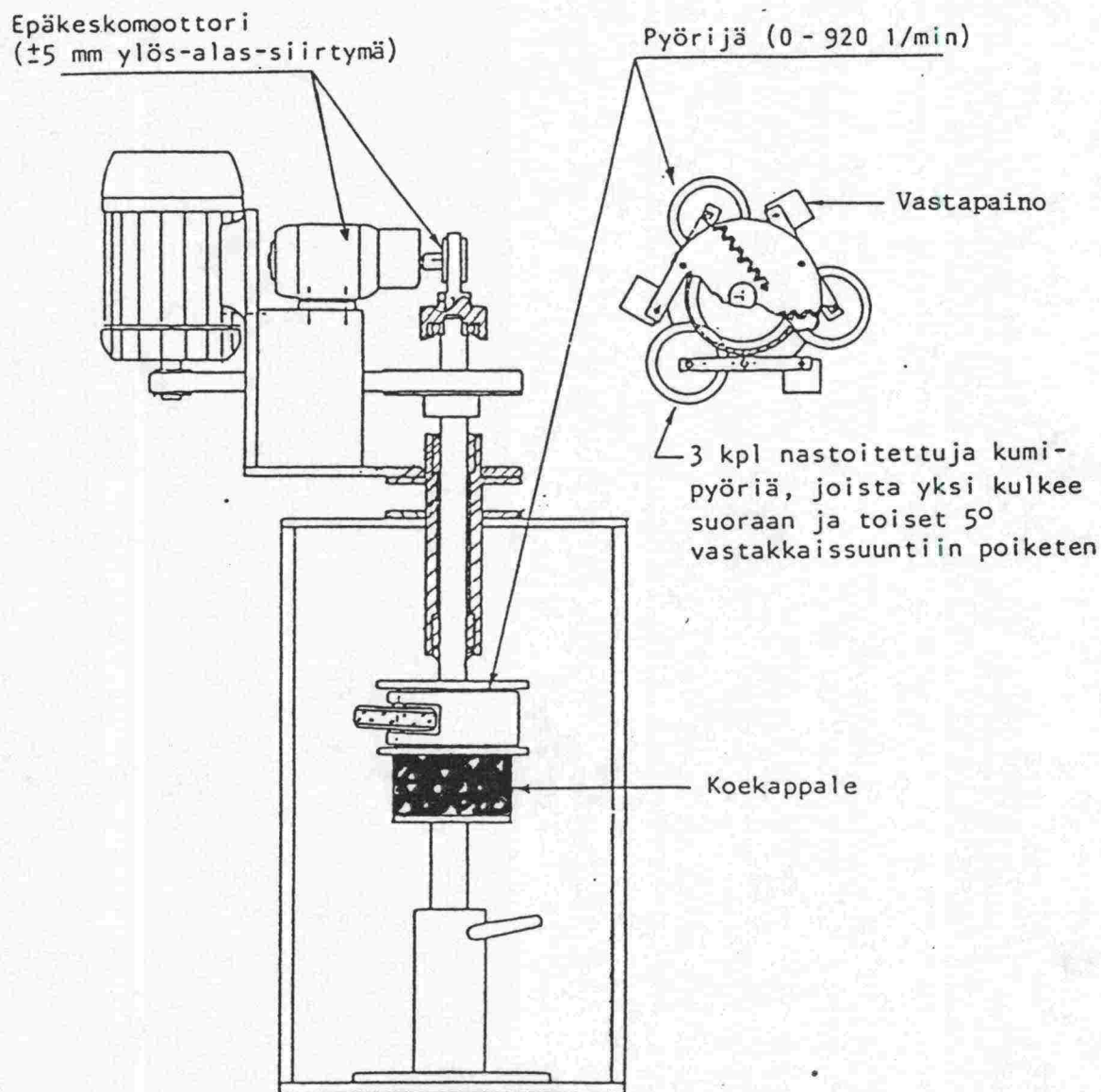
Neulapistooliin tuleva ilmanpaine oli kokeen aikana 0,6 MPa ja näyte pyöri 30 kierrosta minuutissa. Neulapistooli oli lisäksi säädetty niin, että se kulutti kivinäytteessä renkaan muotoista aluetta, jonka ulkohalkaisija oli 71 mm ja sisähalkaisija 12 mm (kuva 13 sivulla 56).

7.1.5 Poranäytteiden kulutuskoe

Tutkittavien kivimateriaalien kulutuskestävyyttä tutkittiin myös VTT:n tie- ja liikennelaboratoriossa kehitetyllä poranäytteiden kulutuslaitteella. Laite on valmistettu lähinnä asfalttimassasta valmistettujen päällystenäytteiden kulutuskestävyyden tutkimiseen, mutta sillä voidaan tutkia myös kiinteiden, kalliosta kairattujen kivinäytteiden kulutuskestävyyttä. Kulutuslaite kohdistaa normaalien henkilöauton renkaissa käytettävien nastojen välityksellä sylinterimäisen näytteen sivupintaan sekä iskuja että raapaisuja. Kulutus jäljittelee melko pitkälle nastarengasliikenteen kulutusta.

Kulutuslaite koostuu näytteen kiinnipitojalustasta, kolmen nastoitettun kulutuspyörän muodostavasta pyörijästä sekä pyörijää ylös-alas liikuttavasta ja pyörittävästä moottorista. Koko kulutuslaite on asennettu kaappiin, jonka lämpötila voidaan laskea aina -20 °C:een saakka. Kuvassa 7 on esitetty yksinkertaistettu piirros poranäytteiden kulutuslaitteesta.

Kuva 7. Piirros VTT:n tie- ja liikennelaboratorion poranäytteiden kulutuslaitteesta.



Kulutuslaitteen pyörijä muodostuu kolmesta halkaisijaltaan 90 mm ja 25 mm leveästä nastoitetusta kumipyörästä, jotka ovat kiinnitetty samaan tasoon pyörijän eri puolille. Nastoitettut pyörät pyörivät paikallaan pysyvän sylinterimäisen näyttekappaleen kehällä. Jokaisessa kumipyörässä on 30 kpl Kometa P 8 100 NR nastoja, joiden ulkonema on 1,5 mm.

Jokainen pyörä painautuu jousen painamana 80 N:n jousivoimalla näytteen kehälle. Yksi pyöristä on kohtisuorassa linjassa näytteen pituusakselia vastaan ja kaksi muuta viisi astetta tästä suunnasta eri suuntiin poiketen. Pyörijän kierrosnopeutta voidaan säätää (0-920 kierrosta/minuutti). Normaalisti kulutuskokeessa kierrosnopeus on 400-450 kierrosta/minuutissa. Epäkeskomoottori liikuttaa pyörijää 5 mm ylös-alas-suunnassa niin, ettei näyte kulu koko aikaa aivan samasta kohdasta.

Kulutuskoe suoritetaan nastapyörillä, joilla on kulutettu poranäytettä ennen varsinaista koetta kahden tunnin ajan. Kaikki pyörät vaihdetaan aina kuuden näytteen jälkeen.

Kulutuskokeen ajan näytteen pintaan ruiskutetaan yhtäjaksoisesti +5 °C lämpötilaista vettä yhdestä suuttimesta noin 60-70 l/tunnissa.

Kulutuslaitetta ympäröivään kaappiin on asennettu jäähdytyslaitteisto niin, että kulutuskoe voidaan suorittaa huoneenlämpötilaa alhaisemmissa lämpötiloissa. Normaalisti koe suoritetaan +5 °C:een lämpötilassa samaan lämpötilaan temperoidulla näytteellä.

Kulutuskokeen tulos ilmoitetaan kahden tunnin aikana kuluneen aineksen määrä grammoina tai kuluneen aineksen tilavuutena (cm^3).

Asfalttinäytteillä suoritetuissa kulutuskokeissa rinnakkaisnäytteiden kulumisen keskihajonta on ollut 12,5 % keskiarvosta.

Kulutuskokeita varten koemateriaalina käytetyistä kiviappaleista kairattiin liuskeisuutta vastaan kohtisuorassa tai lähes kohtisuorassa suunnassa 100 mm halkaisijaltaan olevat näytteet, joista sahattiin noin 50 mm:n mittaiset kappaleet. Kappaleiden päät sahattiin yhdensuuntaisiksi sekä niiden sivuihin sahattiin pystysuunnassa noin 1,5 cm:n välein 4 mm

leveitä ja 10 mm syviä uria. Urien vaikutuksesta kulutusko-
keessa oli tarkoitus saada esille myös kiviaineksen lohkea-
mistaipumus (kuva 14 sivulla 58).

Koska kulutuskoe suoritettiin kiinteillä kivinäytteistä kai-
ratuilla kappaleilla, ei soramurskeen kulutuskestävyyttä
laitteella voitu tutkia.

Suoritetuissa kulutuskokeissa jokaista kivinäytettä kulutet-
tiin kaksi tuntia edellä kuvatulla tavalla.

Kivinäytteillä suoritettujen kulutuskokeiden tulokset ilmoi-
tetaan asfalttimassanäytteiden tavoin kokeen aikana kuluneen
aineksen tilavuutena.

7.2 Kalliomekaaniset lujuus- ja porattavuuskokeet

7.2.1 Kimmomoduli

Kimmomodulilla (E) tarkoitetaan kiveen vaikuttavan jännityk-
sen suhdetta jännityksen suuntaiseen muodonmuutokseen /78/.

Kimmomoduli ilmoittaa lähinnä materiaalin kimmoisuutta.

Kiville on usein ominaista, että mitä suurempi kimmomoduli
on, sitä jäykempi ja usein hauraampi kivi on. Alhaiseen kim-
momoduliin liittyy kiven plastista käyttäytymistä, ts. kives-
sä tapahtuu selvää muodonmuutosta ennen rikkoutumista. Kiven
pehmeyttä tai kovuutta ei voida päätellä pelkän kimmomodulin
perusteella, sillä suuren kimmomoduliarvon voivat saada sekä
kovat että pehmeät kivet.

Kiven muodonmuutos- ja lujuusominaisuuksia selvitetään kal-
liomekaniikassa yleensä puristamalla sylinterimäisiä koekap-
paleita. Tässä tutkimuksessa kimmomodulin määrittämisessä näyt-
teet valmistettiin soveltuvin osin ISRM:n (International
Society for Rock Mechanics) standardien mukaisesti /18/.

Näytteinä käytettiin kivisylintereitä, joiden läpimitta oli
32 mm. Em. standardin mukaan läpimitan tulisi olla yli 10 x
suurimman mineraalin raekoko, kuitenkin suurempi kuin 54 mm.

Näytteiden pituus oli noin 85 mm eli 2,7 x halkaisija. Kimmodulimittaukset tehtiin neljästä samaa kiveä olevasta näytteestä ja lopullinen tulos ilmoitetaan näiden keskiarvona. Suuntautuneilla kivillä kvartsiitilla ja amfiboliitilla kimmodulimittaus kuten muutkin kalliomekaaniset lujuus- ja porattavuuskokeet suoritettiin kahdessa eri suunnassa eli liuskeisuuden (venymä, kerroksellisuus) suunnassa ja tätä vastaan kohtisuorassa olevassa suunnassa. Suosituksen mukaan pituuden tulisi olla 2,5 - 3 x näytteen halkaisija sekä koekappaleita tulisi olla vähintään 5 kpl/määrittäminen. Näytteet puristettiin 50 kN:n kuormaan saakka ja samalla mitattiin näytteen pitkittäinen lyhenemä. Kuormitusnopeus oli standardin mukainen 0.6 MPa/sekunti.

Kimmomoduli lasketaan kaavasta:

$$E = \frac{4 \Delta F (l_0 - 0.009)}{\pi \Delta l d_0^2}$$

- E = kimmomoduli (Pa)
 ΔF = voiman lisäys (N)
 l_0 = koekappaleen alkuperäinen pituus (m)
 Δl = koekappaleen pituuden lyhenemä (m)
 d_0 = koekappaleen alkuperäinen läpimitta (m)

7.2.2 Poissonin luku

Poissonin luvulla tarkoitetaan jännitystä vastaan kohtisuoran muodonmuutoksen suhdetta jännityksen suuntaiseen muodonmuutokseen /38/. Poissonin luku ilmoittaa kimmomodulin tavoin lähinnä kiven muodonmuutosominaisuutta. Poissonin luku on laaduton ja yleensä luokkaa 0.1 - 0.5. Suuri Poissonin lukuarvo esiintyy kimmoisilla materiaaleilla.

Poissonin luku määritettiin tässä tutkimuksessa kimmomodulin määrittämisestä yhteydessä mittaamalla koekappaleen säteen suuntainen laajenema.

Poissonin luku lasketaan kaavasta:

$$\nu = \frac{\Delta d(l_0 - 0.009)}{d_0 \Delta l}$$

- ν = Poissonin luku
 Δd = koekappaleen paksunema (m)
 l_0 = koekappaleen alkuperäinen pituus (m)
 d_0 = koekappaleen alkuperäinen läpimitta (m)
 Δl = koekappaleen lyhenemä (m)

7.2.3 Puristusmurtolujuus

Kiven puristusmurtolujuudella tarkoitetaan kiven suurinta kuormankantokykyä ennen murtumista /38/. Yksiaksaalisen puristusmurtolujuuden määrittämisessä käytettiin tässä tutkimuksessa samoja näytteitä kuin kimmomodulin ja Poissonin luvun määrittämisessä. Yksiakseliaalinen puristusmurtolujuus lasketaan kaavasta

$$\sigma_p = F/A.$$

- σ_p = yksiakseliaalinen puristusmurtolujuus (MPa)
 F = koekappaleen murtokuormitus (N)
 A = koekappaleen poikkipinta-ala (mm²)

Yleensä kiven puristusmurtolujuus on 90-95 % suurempi kuin sen vetomurtolujuus.

7.2.4 Vetomurtolujuus

Kiven vetomurtolujuudella tarkoitetaan kiven suurinta vetojännityksen sietokykyä ennen murtumista /38/. Kiven vetomurtolujuus määritetään yleensä epäsuorasti viivakuormituslujuutena ns. Brazilian kokeella. Kokeessa kairasydännäyte (Ø32 mm x 32 mm) asetetaan pitkittäin kyljelleen kahden 5 mm leveän kiskon väliin. Kiskoja kautta aiheutettu kuormitus

aiheuttaa vetojännityksen kohtisuoraan koekappaleen akselia ja puristussuuntaa vastaan. Vetomurtolujuus lasketaan yhtälöstä:

$$\sigma_{vm} = 2F/dl$$

σ_{vm} = vetomurtolujuus (MPa)

F = koekappaleen murtokuormitus (N)

d = näytteen halkaisija (mm)

l = näytteen pituus (mm)

7.2.5 Pistekuormitusindeksi

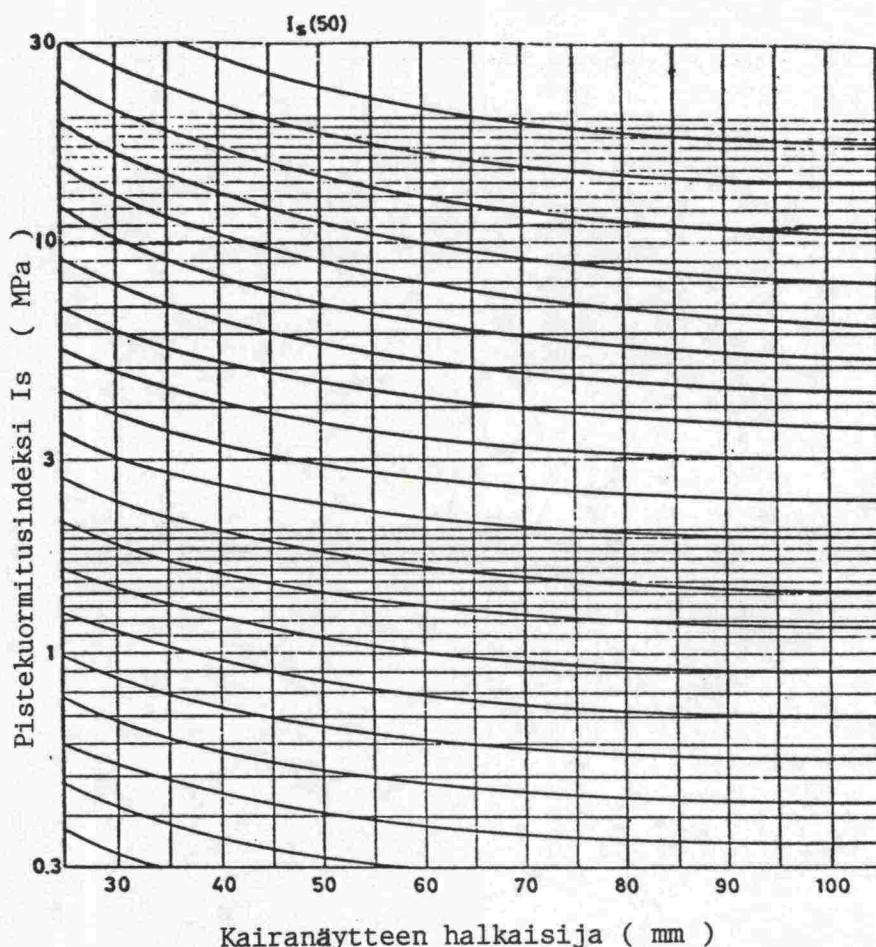
Pistekuormitusindeksi ilmoittaa kiven suurimman kuormankantokyvyn ennen murtumista siten, että kuormitus tapahtuu puristumurtolujuusmittauksesta poiketen pienelle, lähes pistemäiselle alueelle /38/. Pistekuormituskokeen avulla koekappaleille määritetään pistekuormitusindeksi. Indeksistä voidaan laskea myös vetomurtolujuus tai sitä voidaan käyttää sellaisenaan eri koekappaleiden lujuuksien vertailemiseen.

Suoritetuissa pistekuormituskokeissa sylinterimäiset koekappaleet ($\phi 32$ mm x 49 mm) asetettiin pitkittäin kartiomaisten pallopäisten ($r = 5$ mm) kuormituskappaleiden väliin. Yleisenä vertailuarvona käytetään $Is(50)$ -indeksiä, mikä on 50 mm:n koekappaleesta määritetty indeksiä, mikä on 50 mm:n koekappaleesta määritetty indeksiä. Pistekuormituskokeen tulos $Is(32)$ muutettiin $Is(50)$:ksi kuvan 8 nomogrammin avulla. Nomogrammin avulla voidaan verrata halkaisijaltaan 25 - 105 mm:n näytteiden pistekuormitusindeksejä toisiinsa. Koe voidaan tehdä myös epäsäännöllisen muotoisilla kappaleilla. Pistekuormitusindeksi saadaan yhtälöstä:

$$Is = \frac{F}{d^2}$$

Is = Pistekuormitusindeksi (MPa)

d = Kuormituskappaleiden kärkien välinen etäisyys (mm)



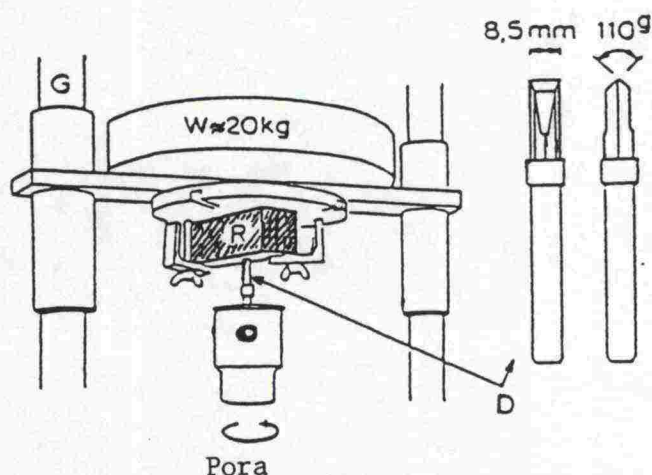
Kuva 8. Koekappaleen halkaisijan vaikutus pistekuormitusindeksiin /18/.

7.2.6 Sieversin J' -arvo

Sieversin J' -arvo kuvaa kiven kykyä vastustaa leikkaavia voimia /42/. Sieversin J' -arvo määritetään pienen porakoneen terän tunkeutumisvyytenä kiveen. Arvo ilmoitetaan 1/10 mm:n tarkkuudella kun poranterä on pyörinyt 200 kierrosta (kuva 9). Terän pyörimisnopeus on 3 kierrosta/sekunnissa. Laboratorioporassa ei käytetä iskua. Jokaisen kivinäytteen Sieversin J' -arvo määritettiin tässä tutkimuksessa 4 - 5 kokeen keskiarvona. Sieversin J' -arvo määritettiin pinnaltaan tasaisesta näytepalasta, jonka suuruus oli noin 4 x 4 x 8 cm. Kokeessa porakone pysyy paikallaan ja näytettä kuormitetaan päältä päin 21,1 kg:n painolla. Poraus tapahtuu kohtisuoraan näytteen pintaa vastaan.

Kovametalliterän ominaisuudet:

Vickersin kovuus	1280
kobolttipitoisuus	9%
wolframikarbidirakeiden keskimääräinen raekoko	4 um



G = Ohjaimet
W = Paino (21.1 kg)
D = Poranterä
R = Kivinäyte

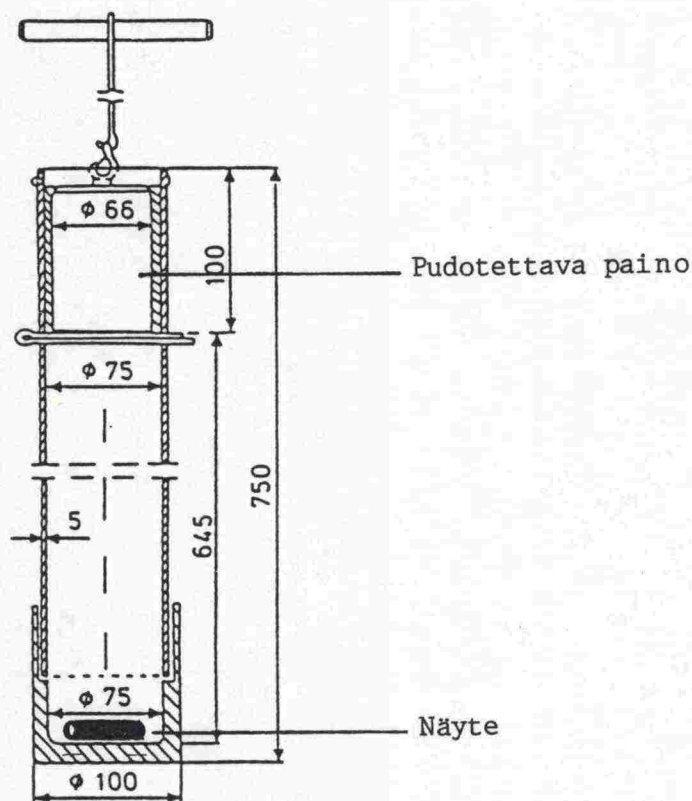
Kuva 9. Sieversin J'-arvon määrittäminen /33/.

Sieversin J'-arvo on yleensä suuri pehmeillä ja pieni kovilla sekä sitkeillä kivillä. Erikoisesti heterogeenisillä kivillä Sieversin J'-arvo vaihtelee porauskohdasta riippuen.

7.2.7 Proto 20'-arvo

Proto 20':n määrittäminen on laboratoriokoe, jolla määritetään kiviaineksen iskunkestävyyttä kuvaava haurausarvo pienestä näytelmästä /42/. Proto 20'-arvon määrittämissä on menetelmänä hyvin samankaltainen kuin parannettu haurausarvokoe. Parannettuun haurausarvokokeeseen verrattuna Proto 20'-arvo määritetään pienestä kiviainemäärästä. Proto 20'-koetta varten tarvitaan 3 kpl kairasydännäytteitä, joiden halkaisija ja pituus on 32 mm. Koe suoritetaan nk. Protodyakonovin pudotuslaitteella (kuva 10).

Kokeissa näytekappaleet murskattiin yksi kerrallaan pudottamalla 2,4 kg painava pudotusvasara 64,5 cm:n korkeudelta 20 kertaa. Saatu murske seulottiin 2.83 mm:n seulalla. Saatu läpäisyprosentti on Proto 20'-arvo. Yhteen seulontaerään yhdistettiin kolmen yksittäisen kappaleen murskeet. Kaikkiaan Proto 20'-arvo laskettiin kolmen erän keskiarvona.



Kuva 10. Protodyakonovin pudotuslaite /33/.
(Mitat mm:nä)

7.2.8 Haurausarvo S20'

Haurausarvoa S20' käytetään laskettaessa porausnopeusindeksiä (PNI) /42/.

Tässä tutkimuksessa haurausarvo S20' määritettiin epäsuorasti Proto20':n avulla käyttämällä kaavaa:

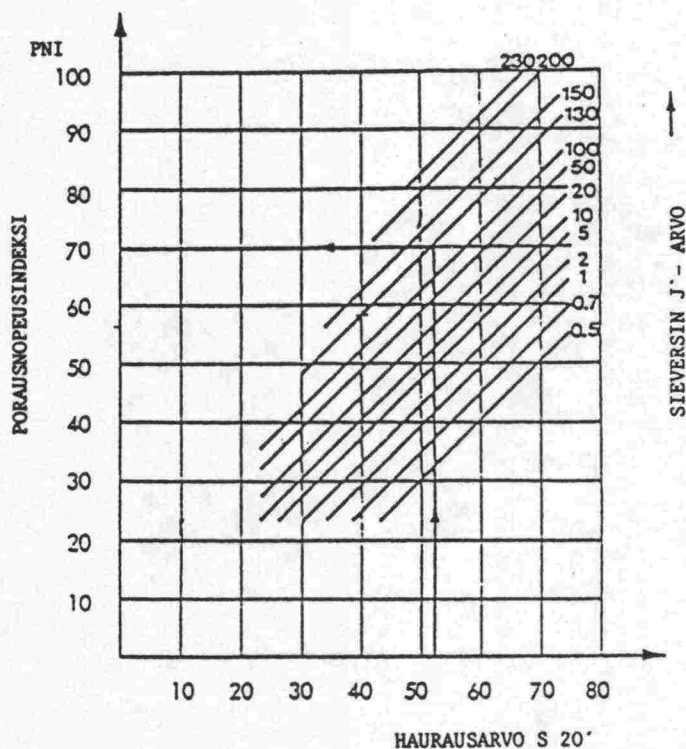
$$S20' = 16.5 + 0.659 \text{ Proto}20'$$

Haurausarvo S_{20}' :n laskukaava on määritetty Teknillisen korkeakoulun louhintatekniikan laboratoriossa tehtyjen koetuloksien perusteella /32/.

7.2.9 Porausnopeusindeksi

Porausnopeusindeksillä (PNI) pyritään kuvaamaan kallioporakoneen terän tunkeutumismopeutta kallioon /42/. Porausnopeusindeksi määritetään kuvan 11 diagrammin avulla käyttämällä kiiven haurausarvoa S_{20}' ja Sieversin J' -arvoa. Porausnopeusindeksi (PNI) on arvoltaan suuri kun poran tunkeutumismopeus (m/min) on myös suuri.

Laboratoriokokeiden perusteella suoritettavan porattavuuden määrittämisessä porattavuuteen vaikuttavien muuttujien lukumäärä on pienempi kuin maastossa suoritettavassa kallioporauksessa.



Kuva 11. Porausnopeusindeksin PNI määrittäminen haurausarvon S_{20}' ja Sieversin J' -arvon perusteella /33/.

7.3 Kivirakeiden muoto

Kivirakeiden muoto vaikuttaa asfalttipäällysteiden kulutuskestävyyteen siten, että tasamittaisista kivirakeista valmistetuilla päällysteillä on todettu olevan parempi kulutuskestävyys kuin puikko- tai laattamaisista kivirakeista valmistetuilla päällysteillä /5,46/. Päällysteen pinnansuuntaisien puikko- ja laattamaisien kivirakeiden on todettu katkeavan ja rikkoutuvan päällysteessä jyräyksen ja liikenteen vaikutuksesta helpommin kuin vastaavan mineraalikoostumuksen omaavien samansuuruisien tasamittaisien kivirakeiden /46/. Puikko- ja laattamaisista kivirakeista valmistettujen asfalttimassojen on todettu olevan myös tasamittaisista kivirakeista valmistettuja asfalttimassoja vaikeammin tiivistettäviä /5,46/.

Kiviaineksesta murskauksessa syntyvien kivirakeiden muoto on määritetty tässä tutkimuksessa ns. muotoarvona /39/. Muotoarvo ilmoitetaan murskatusta kiviäytteestä 8-12 mm:n fraktios- ta sattumanvaraisesti otetun sadan kivirakeen akseleiden keskiarvojen suhteena. Kivirakeen muoto määritetään kivirakeen pituuden suhteena paksuuteen (c/a) sekä leveyden suhteena paksuuteen (b/a). Edellinen ilmoittaa kivirakeiden puikkoi- suuden ja jälkimmäinen liuskeisuuden eli kivirakeen laatta- maisuuden.

Muotoarvo kuvastaa koko kiviaineksen suuntautuneisuutta si- ten, että pieni muotoarvo (c/a tai b/a) on yleensä suuntautu- mattomilla massamaisilla kiviaineksilla ja suuri muotoarvo voimakkaasti suuntautuneilla kiviaineksilla. Puikkomaisia kivirakeita muodostuu murskattaessa voimakkaan venymän omaa- via tai yhdensuuntaisesti järjestyneistä muodoltaan puikkoi- sista mineraaleista koostuneita kiviaineksia. Liuskeisia eli levymäisiä kivirakeita muodostuu puolestaan murskattaessa voimakkaan liuskeisuuden omaavia tai yhdensuuntaisesti jär- jestyneistä muodoltaan levymäisistä mineraaleista koostuneita kiviaineksia.

Yleensä kiviaineksista muodostuu murskauksessa enemmän levy- mäisiä kuin puikkomaisia kivirakeita, koska liuskeisuus on Suomen kallioperässä dominoiva kallioperän rakennesuure.

Kuvassa 12 on esitetty TVH:n käyttämien murskeiden laatuvaatimusluokkien muotoarvovaatimukset.

Kuva 12. Murskaiden laatuluokat ja niiden vaatimusrajat /39/.

Laatu- luokka	Laatuominaisuus			
	Lujuus		Muoto	
	Los-Ange- les luku	Paran- nettu hauraus arvo	Puikkoisuus (c/a)	Liuskeisuus (b/a)
A	≤ 20	≤ 18	$\leq 2,5$	$\leq 1,5$
I	≤ 25	≤ 22	$\leq 2,5$	$\leq 1,7$
II	≤ 30	≤ 26	$\leq 2,7$	$\leq 1,8$
III	≤ 35	≤ 30	$\leq 2,9$	$\leq 1,9$

Murskattujen kivirakeiden muoto riippuu ensisijaisesti kiven rakenteesta, mutta kivirakeiden muotoon vaikuttaa myös murskauslaitteet ja -tekniikka.

Muotoarvon määrittäminen ei ole tarkka menetelmä, sillä samoista kivirakeista määritetyt muotoarvotulokset eri henkilöiden tekeminä vaihtelevat hyvin huomattavasti. Mittaustarkkuuden on todettu VTT:n tie- ja liikennelaboratorion tekemissä toistettavuuskokeissa olevan $\pm 10\%$ /20/.

Muissa Pohjoismaissa tiepäällysteiden kiviaineksien laatuluokitusmenetelmissä kivirakeiden muotoa ei määritetä yksitellen eri kivirakeita näytteestä mittaamalla, vaan muoto ilmoitetaan seulomalla ja välppäämällä saatavana liuskeisuusarvona.

7.4 Hietutkimukset

Tutkittavista kallionäytteistä valmistettiin ohuthieet, jotka tutkittiin polarisaatiomikroskoopilla käyttäen 10...50 kertaisia suurennuksia /28/. Suuntautuneista kivistä hieet tehtiin kohtisuoraan liuskeisuutta tai venymää vastaan.

Hieistä on määritetty kivissä esiintyvät mineraalit ja niiden prosentuaaliset osuudet (liite 3). Prosentuaaliset osuudet on määritetty point countermetelmällä (200-400 havaintopistettä/hie). Lisäksi ohuthieistä on arvioitu kiven keski- ja maksimiraekoko. Keskimääräinen raekoko on määritetty arvioimalla päämineraalien keskimääräiset raekoot ja laskemalla niiden painotettu keskiarvo. Maksimiraekokona on käytetty suurimman kiteen suurinta halkaisijaa. Kiven rakennetta tutkittaessa on kiinnitetty erityistä huomiota mineraalien muuttuneisuuteen ja raerajoihin sekä mahdollisiin mikrorakoihin. Kivet on nimetty Streckeisenin luokituksen mukaan /36/.

Kivien Vickersin kovuudet (VHK) on saatu laskemalla eri mineraalien kovuuksien keskiarvo painotettuna mineraalien prosentuaalisella osuudella. Mineraalien kovuusarvoina on käytetty kirjallisuudesta saatuja arvoja /40/.

8. KULUTUSKOKEIDEN JA MUOTOARVOMITTAUKSIEN TULOKSET

8.1 Los Angeles-koe

Koemateriaalina käytetyistä yhdestätoista kiviaineksesta tehtyjen Los Angeles-kokeiden tuloksien keskiarvo oli 21,6. Taulukon 5 mukaisesti parhaiten menestyivät Koskenkylän tonalliitti, Paapanluhdanmäen amfiboliitti sekä Usmin gabro. Huonoimmat arvot saivat Vehmaan graniitti ja Isotalon kiillegneissi. Nukarin soramurske sai hieman keskiarvoa paremman tuloksen.

Tarkasteltaessa kokeiden tuloksia voidaan havaita, että Los Angeles-kokeessa menestyvät sitkeät, hieman elastiset kiviainekset. Kimmoisuuden lisäksi tyypillistä kokeessa menestyneille kiviaineksille on, että niissä ei esiinny raekooltaan suuria helposti lohkeavia mineraaleja eikä niissä esiinny mineraalien ryhmittymisen suhteen selviä heikkousvyöhykkeitä kuten kiillemineraalikasautumia. Kokeessa hyvin menestyneet

kivifaineekset ovat em. ominaisuuksien lisäksi pienipiirteis-
sään hieman vaihtelevan raekoostumuksen omaavia kiviaineksia
(kts. liite 2, kivilajikuvaukset).

Taulukko 5. Los Angeles-kokeiden tulokset ja TVH:n käyttämän
murskeiden laatuluokituksen mukainen laatuluokka

Kiviaines	Ottopaikka	Los Angeles-luku	Laatuluokka
Tonaliitti	Koskenkylä	13,7	A
Amfiboliitti	Paapanluhdanmäki	16,1	A
Gabro	Usmi	17,2	A
Granodioriitti	Ilvesvuori	18,4	A
Kvartsiitti	Rytyli	18,9	A
Tuffiitti	Rippu	21,2	I
Soramurske	Nukari	22,6	I
Graniitti	Mustio	23,0	I
Kvartsidioriitti	Nummenoja	25,1	II
Kiillegneissi	Isotalo	27,2	II
Graniitti	Vehmaa	34,4	III
	Keskiarvo	21,6	
	Keskihajonta	5,8	

Los Angeles-kokeessa hyvin menestyneen Koskenkylän tonaliitin
kulutuskestävyys perustuu päämineraalien pieneen (raekoko
keskimäärin 0,2 mm), mutta silti hieman vaihtelevaan raeko-
koon, mineraalien (erikoisesti kvartsi ja maasälpämineraa-
lien) väliseen lujaan sitoutumiseen sekä kovien (kvartsia
32 %, Mohsin kovuus 7, plagioklaasia 53 %, Mohsin kovuus 6)
mineraalien esiintymiseen sekaisin pehmeämpien mineraalien
(amfibolia 9 %, epidoottia 5 %) joukossa. Päämineraalien
(kvartsi ja plagioklaasi) kovuudesta ja helposta lohkeamis-
ta johtuva hauraus eivät pienestä mineraalien raekoosta joh-
tuen heikennä kiviainesta.

Paapanluhdanmäen amfiboliitin hyvä Los Angeles-luku johtuu kiven sitkeydestä (asultaan kuitumaista sarvivälkettä 61 %) sekä mineraalien pienestä raekoosta. Usmin gabron hyvään Los Angeles-lukuun ovat vaikuttaneet tasaisesti esiintyvät amfiboli- ja pyrokseenimineraalit, mineraalien pieni raekoko (keskimäärin 1,5 mm) sekä mineraalien lomittaisesta esiintymisestä johtuva luja kutous.

Kokeessa huonoimmin menestyneiden Vehmaan graniitin ja Isotalon kiillegneissin huonot arvot johtuvat lähinnä suuresta mineraalien raekoosta (Vehmaan graniitilla 3,5 mm ja Isotalon kiillegneissillä 1,3 mm), suurien kiille- ja maasälpämineraalien helposta lohkeavuudesta sekä erikoisesti kiilteiden, maasälpämineraalien sekä granaattikasautumien liittymisestä toisiinsa lujuudeltaan heikoilla, melko suorilla raerajoilla. Kiillegneissillä kiilteen esiintyminen suuntautuneina muita mineraaleja erottavina vyöhykkeinä aiheuttaa kivirakeisiin rakenteellista heikkoutta.

Nukarin soramurskeen verrattain hyvä Los Angeles-luku johtuu lujan graniittisen kiviaineksen määrästä (noin 70 % näytteestä), graniittisien ja elastisien kvartsi-maasälpäliuskeisien (noin 15 %) kivirakeiden pienestä mineraalien raekoosta (noin 0,7 mm) sekä kivirakeiden osittain luonnonpintaista, pyöreistä kivipinnoista.

8.2 Parannettu haurausarvokoe

Tutkituilla kiviaineksilla parannetun haurausarvokokeen tulokset olivat hyvin samankaltaiset Los Angeles-kokeiden tuloksien kanssa (p-haurausarvo- ja Los Angeles-kokeiden tuloksien välinen korrelaatio $r=0,98$, liite 6). Haurausarvokokeissa ainoastaan Usmin gabron ja Paapanluhdanmäen amfiboliitin sekä Nukarin soramurskeen ja Ripun tuffiitin tulokset vaihtoivat järjestystä Los Angeles-kokeiden tuloksiin verrattuna.

Suoritettujen parannetun haurausarvokokeiden tuloksien keskiarvo oli 17,9. Taulukon 6 mukaisesti parhaimmat arvot saivat Koskenkylän tonaliitti, Usmin gabro ja Paapanlahden amfiboliitti. Vastaavasti huonoimmat arvot saivat Vehmaan graniitti ja Isotalon kiillegneissi. Nukarin soramurske sai keskiarvoa hieman paremman arvon.

Taulukko 6. Parannetun haurausarvokokeen tulokset ja TVH:n käyttämän murskeiden laatuluokituksen mukainen laatuluokka

Kiviaines	Ottopaikka	Parannettu haurausarvo	Laatuluokka
Tonaliitti	Koskenkylä	12,6	A
Gabro	Usmi	14,1	A
Amfiboliitti	Paapanluhdanmäki	14,5	A
Granodioriitti	Ilvesvuori	15,0	A
Kvartsiitti	Rytyli	16,1	A
Soramurske	Nukari	16,9	A
Tuffiitti	Rippu	17,7	A
Graniitti	Mustio	19,7	I
Kvartsidioriitti	Numeenoja	20,0	I
Kiillegneissi	Isotalo	21,0	I
Graniitti	Vehmaa	29,5	III
Keskiarvo		17,9	
Keskihajonta		4,7	

Haurausarvokokeessa menestyivät Los Angeles-kokeen tavoin hieman kimmoiset, sitkeät ja pehmeät kiviainekset, jotka koostuvat lujasti toisiinsa kiinnittyneistä mineraaleista.

Yleensä kiviainekset, jotka koostuvat epämääräisen muotoisilla rajarajoilla toisiin mineraaleihin liittyneistä mineraaleista saavat kokeissa paremman arvon kuin suorilla ns. oma-muotoisilla raerajoilla toisiin mineraaleihin liittyvistä

mineraaleista koostuvat kiviainekset. Erikoisesti raekooltaan suuret mineraalit ja mineraaliryhmät heikentävät kiven iskunkestävyyttä.

Koskenkylän tonaliittisessa kiviaineksessa mineraalien pieni raekoko ja sitkeiden amfiboli- ja epidoottimineraalien esiintyminen kovien kvartsi- ja plagioklaasimineraalien lomissa saavat aikaan hyvän iskunkestävyyden.

Usmin gabron ja Paapanluhdanmäen amfiboliitin hyvä iskunkestävyys johtuu sitkeistä amfiboli- ja pyrokseenimineraaleista sekä mineraalien pienestä, hieman vaihtelevasta raekoosta. Erikoisesti gabron iskunkestävyyteen vaikuttaa myös mineraalien lomittaisesta sijainnista johtuva rakenne.

Vehmaan graniitin ja Isotalon kiillegneissin huono iskunkestävyys johtuu pääasiassa suuresta mineraalien raekoosta, kiille- ja maasälpämineraalien helposta lohkeamisesta sekä heikosta kiinnittymisestä toisiinsa. Kiillegneissillä yhteinäisesti suuntautuneet kovempia mineraaleja erottavat kiillekasautumat heikentävät kivirakeiden iskunkestävyyttä.

Nukarin soramurskeen verrattain hyvä parannettu haurausarvo johtuu pääasiassa kiviaineksen pienestä mineraalien raekoosta (keskiraekoko noin 0,7 mm) sekä kvartsi-maasälpä-kiilleliuskeisen ja graniittisen kiviaineksen elastisuutta lisäävästä, kiillettä sisältävästä mineraalikoostumuksesta. Soramurskeen hyvään iskunkestävyyteen vaikuttaa myös kivirakeiden osittainen luonnonpintainen pyöreys. Tällöin kivirakeista ei irtoa kivirakeiden särmiä niin helposti kuin terävasärmäisistä kivirakeista.

8.3 Hioutuvuuskoe

Parhaimmat hioutuvuusarvot saivat Koskenkylän tonaliitti, Rytylin kvartsiitti ja Mustion graniitti. Heikoiten hiovaa kulutusta kestävät Paapanluhdanmäen amfiboliitti, Nummenojan kvartsidioriitti ja Usmin gabro. Nukarin soramurske sai keskiarvoa hieman paremman arvon (taulukko 7).

Taulukko 7. Hioutuvuuskokeiden tulokset

Kiviaines	Ottopaikka	Hioutuvuusluku (cm ³)
Tonaliitti	Koskenkylä	1,46
Kvartsiitti	Rytyli	1,65
Graniitti	Mustio	1,79
Soramurske	Nukari	1,85
Graniitti	Vehmaa	2,16
Granodioriitti	Ilvesvuori	2,22
Kiillegneissi	Isotalo	2,38
Tuffiitti	Rippu	2,49
Gabro	Usmi	2,64
Kvartsidioriitti	Nummenoja	2,75
Amfiboliitti	Paapanluhdanmäki	3,07
	Keskiarvo	2,22
	Keskihajonta	0,50

Hioutuvuuskoe testaa lähinnä kiven naarmutuskovuutta. Mineraalien ryhmittymisestä johtuva kiven rakenteellinen heikkous, joka ilmenee lähinnä kiven helppona lohkeamisena tulee kokeessa hyvin heikosti esille.

Kokeessa menestyvät hyvin kovista mineraaleista, kuten kvartsiista, plagioklaasista, kalimaasälvästä koostuvat kiviainekset. Koemateriaalina käytetyissä kiviaineksissa näitä mineraaleja on runsaasti kaikissa hyvin menestyneissä kiviaineksissa.

Kokeessa menestyvät huonosti pääosin pehmeistä ja usein samalla sitkeistä mineraaleista kuten amfiboli-, kiille-, kloriitti-, serpentiini- ja usein pyrokseenimineraaleista koostuneet kiviainekset. Koemateriaalina käytetyissä kiviaineksissa pehmeitä mineraaleja esiintyy mm. Paapanluhdanmäen amfiboliitissa, Nummenojan kvartsidioriitissa ja Usmin gabrossa.

Isotalon kiillegneissi on saanut kokonaismineraalikoostumukseensa nähden hyvän hioutuvuustuloksen, mikä johtuu siitä, että näytteeseen ei ole sattunut runsaasti pehmeitä kiillerikkaita kivirakeita. Kiillegneissien heterogeenisyydestä johtuen hioutuvuusarvot, kuten myös muutkin lujuus- ja kulutuskokeiden tulokset voivat vaihdella huomattavasti.

Nukarin soramurskeen hioutuvuusnäytteessä (noin 70 % hienokeskirakeista graniittia, noin 20 % kvartsi-maasälpä-kiilleliusketta ja 10 % keskirakeista kiillegneissiä) on runsaasti raaputuskovia mineraaleja, mistä johtuen näyte sai verrattain hyvän hioutuvuusarvon.

8.4 Tröger-kulutuskoe

Tröger-kulutuslaitteella suoritetuissa kulutuskokeissa kymmenen kivinäytteen kulumisen keskiarvo oli $7,51 \text{ cm}^3$. Taulukon 8 mukaisesti parhaiten laitteen aiheuttamaa kulutusta kestäivät Koskenkylän tonaliitti, Rytylin kvartsiitti ja Mustion graniitti ja heikoiten Paapanluhdanmäen amfiboliitti, Isotalon kiillegneissi ja Usmin gabro.

Taulukko 8. Tröger-kulutuskokeen tulokset (kulutusaika 60 min/näyte, kulutus märkänä).

Kiviaines	Ottopaikka	Trögerarvo (cm^3)
Tonaliitti	Koskenkylä	0,24
Kvartsiitti	Rytyli	0,32
Graniitti	Mustio	0,78
Granodioriitti	Ilvesvuori	3,49
Tuffiitti	Rippu	4,16
Graniitti	Vehmaa	5,95
Kvartsidioriitti	Nummenoja	11,03
Gabro	Usmi	11,17
Kiillegneissi	Isotalo	16,83
Amfiboliitti	Paapanluhdanmäki	21,16
	Keskiarvo	7,51
	Keskihajonta	7,29

Suoritetuissa kokeissa menestyivät hioutuvuuskokeen tavoin raapaisukovista ja lujasti toisiinsa sitoutuneista mineraaleista koostuneet homogeeniset tai melko homogeeniset kiviainekset (hioutuvuus- ja Trögerkokeiden tuloksien välinen korrelaatio $r=0,89$, liite 6).

Kokeessa hyvin menestynyt hienorakeinen Koskenkylän tonaliitti koostuu valtaosaltaan kovista mineraaleista kvartsista (32 %) ja plagioklaasista (53 %), joiden Mohsin kovuusasteikon mukaiset kovuudet ovat 7 ja 6. Kiven Vickersin kovuus on myös suuri (869). Kokeessa lähes yhtä hyvin kulutusta kestänyt Ryttylin hienorakeinen kvartsiitti koostuu lähes yksinomaan kvartsista (97 %), jolloin kiven Vickersin kovuuskin on erittäin suuri (1030). Mustion graniitissa kovuudeltaan pehmeämmän kiilteen (8 %) osuus (Mohsin kovuusasteikolla 2,5-3) laskee kiven Vickersin kovuutta (817), mutta kiilteen pienestä raekoosta (keskimäärin 0,5-1 mm) ja tasaisesta esiintymisestä johtuen kivi kestää hyvin Tröger-laitteen kulutusta.

Paapanluhdanmäen homogeenisen amfiboliitin runsas kuluminen johtuu pehmeän amfibolim mineraalin (Mohsin asteikolla 5-6) runsaasta määrästä (61 %) ja kiviaineksen voimakkaasta suuntautuneisuudesta (kuva 13). Myös Vickersin kovuuden (674) perusteella kivi on tutkituista kiviaineksista pehmeintä.

Isotalon kiillegneissin runsas kuluminen johtuu erikoisesti pehmeiden kiillemineraalien (Mohsin asteikolla 2-3) esiintymisestä yhtenäisinä, gneisseille tyypillisenä kasautumina. Pehmeydestään johtuen näytteen kiillerikkaat kohdat ovat kuluneet muita kohtia selvästi runsaammin.

Myös muissa kivinäytteissä kovien mineraalien joukossa olleet yli 0,5 mm suuremmat pehmeät mineraalit (Mohsin kovuusasteikolla alle 4) ovat kuluneet muita mineraaleja enemmän.

Kuva 13. Tröger-kulutuslaitteella (60 min) märkänä kulutettuja näytteitä. Vasemmalla Paapanluhdanmäen amfiboliitti (näyte 10), keskellä Usmin gabro (näyte 5) ja oikealla Koskenkylän tonaliitti (näyte 8).



Laitteen neulojen iskut ovat siinä määrin heikkoja, ettei mineraalien tai kiven lohkeamisherkkyys etenkin tasaista näytepintaa kulutettaessa tule selvästi esille.

8.5 Poranäytteiden kulutuskoe

VTT:n kulutuslaitteen tulokset vastaavat karkeasti ottaen Tröger-kulutuslaitteella saatuja tuloksia (Tröger- ja VTT:n poranäytteen kulutuskokeiden tuloksien välinen korrelaatio $r=0,64$, liite 6). Tulokset poikkeavat kuitenkin jonkun verran toisistaan, mikä ilmeisesti johtuu siitä, että VTT:n kulutuskokeessa laitteella kulutettiin sileän kivipinnan sijasta sahauksella uritettuja kivipintoja.

Parhaiten laitteen kulutusta kestivät Koskenkylän tonaliitti ja Rytyn kvartsiitti. Heikoiten laitteen kulutusta kesti Usmin gabro ja Isotalon kiillegneissi (taulukko 9, kuva 14).

Taulukko 9. VTT:n tie- ja liikennelaboratorion poranäytteiden kulutuslaitteen tulokset
(kulutusaika 120 min/näyte, kulutus märkänä).

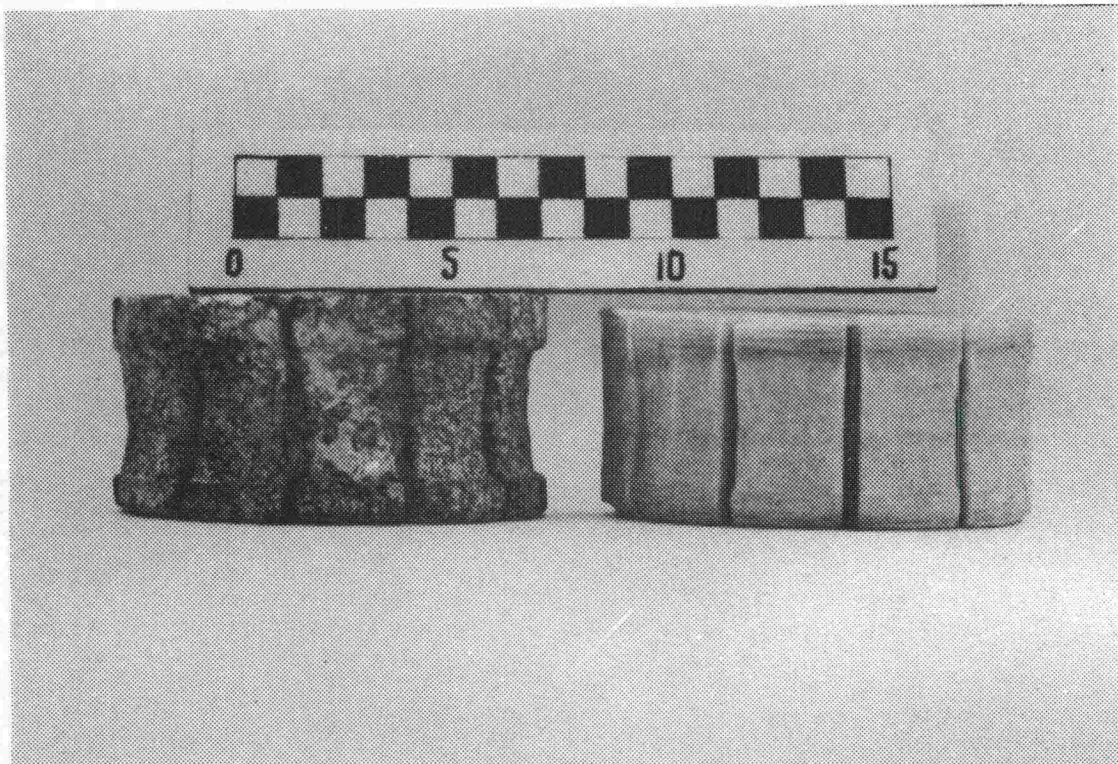
Kiviaines	Ottopaikka	Tulos (cm ³)
Tonaliitti	Koskenkylä	1,0
Kvartsiitti	Rytyli	1,7
Graniitti	Vehmaa	2,9
Graniitti	Mustio	3,4
Granodioriitti	Ilvesvuori	6,3
Tuffiitti	Rippu	8,9
Kvartsidioriitti	Nummenoja	9,3
Amfiboliitti	Paapanluhdanmäki	10,6
Gabro	Usmi	25,6
Kiillegneissi	Isotalo	31,3
	Keskiarvo	10,1
	Keskihajonta	10,3

Laitteen kulutusta kestävät parhaiten homogeeniset, raapaisukovista ja lujasti toisiinsa liittyneistä mineraaleista koostuneet kiviainekset.

Laitteen aiheuttamaa kulutusta kestävät huonosti pehmeistä mineraaleista koostuvat sekä heterogeeniset kiviainekset. Pehmeiden mineraalien esiintyminen kiviaineksessa kasautumina, ryhminä tai vyöhykkeinä erikoisesti keski- tai karkearakeisissa kiviaineksissa lisää laitteella aikaansaatua kulutusta.

Kulutuskokeessa parhaiten kulutusta kestäneet Koskenkylän tonaliitti, Rytylin kvartsiitti ja Vehmaan graniitti koostuvat kovista tai lujasti toisiinsa liittyneistä mineraaleista. Nämä kiviainekset ovat melko homogeenisia, jolloin niissä ei esiinny mineraalikoostumuksen suhteen heikkoja kohtia.

Kuva 14. VTT:n poranäytteiden kulutuslaitteella märkänä yhtä kauan (120 min) kulutetut Isotalon kiillegneissi- (näyte 7)(vas.) ja Rytylin kvartsiitti(näyte 1)-näytteet.



Laitteen kulutusta heikkoiten kestäneet Paapanluhdanmäen amfiboliitti, Usmin gabro ja Isotalon kiillegneissi koostuvat joko valtaosaltaan pehmeistä mineraaleista tai pehmeät mineraalit ovat ryhmittyneet kasautumiksi. Kiillegneissinäytteessä on selvästi havaittavissa, että kiillerikkaat kohdat ovat kuluneet runsaammin kuin raapaisukovuudeltaan kovemmista kvartsi- ja maasälpämineraaleista koostuneet kohdat. Yleensäkin näytteissä kulutuspinnalla olleet raekooltaan yli 0,5 mm suuremmat pehmeät mineraalit, kuten kiille- ja amfibolimineeraalit ovat kuluneet muita mineraaleja enemmän.

Tröger-kulutuslaitteen tavoin poranäytteen kulutuslaite ei aiheuta näytteeseen voimakkaita iskuja, jolloin kivien ja mineraalien lohkeamistaipumus tulisi selvästi esille.

8.6 Muotoarvo

Kaikista koemateriaalina olevista kiviaineksista määritettiin laboratoriomurskaimella saatujen kivirakeiden keskimääräinen muoto. Soramateriaalia lukuunottamatta näytteet murskattiin kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa noin 10-20 cm läpimitaltaan olevat kivet murskattiin leukaväliltään noin 25 mm olevassa leukamurskaimessa. Tämän jälkeen materiaali murskattiin vielä kerran leukaväliltään noin 12 mm olevassa pienemmässä leukamurskaimessa. Soramateriaali murskattiin vain pienemmällä murskaimella.

Taulukon 10 mukaisesti koemateriaalina olleilla kiviaineksilla huonoimmat eli lukuarvoltaan suurimmat muotoarvot saatiin Rytylin kvartsiitilla, Ripun tuffiitilla ja Paapanluhdanmäen amfiboliitilla. Näissä kaikissa kiviaineksen muodostavat mineraalit ovat enemmän tai vähemmän yhdenmukaisesti suuntautuneita.

Rytylin kvartsiitin huono muotoarvo johtuu kvartsiiteille tyypillisestä kerroksellisesta tai kerrallisesta rakenteesta. Massamaisilla ja tasalaatuisilla kiviaineksilla murskatut kivirakeet olivat tasamittaisimpia.

Taulukko 10. Muotoarvomäärityksien tulokset ja TVH:n käyttämän laatuluokituksen mukainen laatu-luokka.

Kiviaines	Ottopaikka	Puikkoisuus- arvo (c/a)	Laatuluokka
Granodioriitti	Ilvesvuori	2,04	A
Gabro	Usmi	2,08	A
Graniitti	Mustio	2,22	A
Kvartsidioriitti	Nummenoja	2,24	A
Soramurske	Nukari	2,31	A
Graniitti	Vehmaa	2,33	A
Kiillegneissi	Isotalo	2,38	A
Tonaliitti	Koskenkylä	2,48	A
Amfiboliitti	Paapanluhdan- mäki	2,69	I
Tuffiitti	Rippu	2,72	II
Kvartsiitti	Rytyli	3,02	III

Kiviaines	Ottopaikka	Liiskeisuus- arvo (b/a)	Laatuluokka
Granodioriitti	Ilvesvuori	1,50	A
Kvartsidioriitti	Nummenoja	1,54	I
Graniitti	Vehmaa	1,54	I
Kiillegneissi	Isotalo	1,56	I
Graniitti	Mustio	1,57	I
Soramurske	Nukari	1,59	I
Gabro	Usmi	1,61	I
Tonaliitti	Koskenkylä	1,66	I
Amfiboliitti	Paapanluhdan- mäki	1,69	I
Tuffiitti	Rippu	1,74	II
Kvartsiitti	Rytyli	1,90	III

9. KALLIOMEKAANISIEN LUJUUS- JA PORATTAVUUSKOKEIDEN TULOKSET

Kaikista kallionäytteistä tehtyjen lujuus-, porattavuus- ja hietutkimuksien tulokset on esitetty liitteissä 2,3,4 ja 5. Seuraavassa on tarkasteltu lähemmin vain niiden lujuus-, porattavuus- ja hietutkimuksien tuloksia, jotka tulosaineiston tilastollisien käsittelyjen perusteella osoittautuivat merkittävimiksi kiviainksen lujuuden ja kulutuskestävyyden parametreiksi (luku 11).

9.1 Kimmomoduli

Suoritetuissa kokeissa suurimmat kimmomoduliarvot saatiin sekä pehmeällä Paapanluhdenmäen amfiboliitilla että hyvin kovalla Rytylin kvartsiitilla. Molemmat kiviainekset ovat hyvin hienorakeisia kivilajeja. Pienimmät kimmomoduliarvot saatiin edellisiä karkearakeisimmilla Nummenojan kvartsidioriitilla ja Vehmaan graniitilla (taulukko 11).

Taulukko 11. Näytteiden kimmomoduli (E)-arvot.

Kiviaines	Ottopaikka	Kimmomoduli- arvo (GPa)
Amfiboliitti (liusk.suunn.)	Paapanluhdenmäki	144,75
" (kohtisuor.l.s.)	"	84,70
Kvartsiitti(kerroks.suunn.)	Rytyli	72,65
" (kohtisuor.k.s.)	"	66,80
Gabro	Usmi	70,80
Tuffiitti	Rippu	69,80
Tonaliitti	Koskenkylä	64,83
Kiillegneissi	Isotalo	59,00
Granodioriitti	Ilvesvuori	58,70
Graniitti	Mustio	57,50
Kvartsidioriitti	Nummenoja	50,04
Graniitti	Vehmaa	49,71
	Keskiarvo	70,77
	Keskihajonta	25,33

Vehmaan ja Mustion graniitin sekä Nummenojan kvartsidioriitin pieneen kimmomoduliarvoon on vaikuttanut mineraalien suuri raekoko.

Paapanluhdanmäen amfiboliitilla kimmomoduliarvo on liuskeisuutta (= venymä) vastaan kohtisuorassa olevassa suunnassa (84,75 GPa) lähes puolet pienempi mitä liuskeisuuden (= venymä) suunnassa (144,75 GPa). Tämä johtuu sauvamaisten, kimmoisien amfibolimineraalien esiintymisestä liuskeisuuden suunnassa. Tällöin amfibolirakeet joustavat enemmän liuskeisuuden suunnassa kuin liuskeisuutta vastaan kohtisuorassa olevassa suunnassa.

Rytylin kvartsiitilla kimmomoduliarvo oli joustavammassa kerroksellisuuden suunnassa hieman suurempi kuin kerroksellisuutta vastaan kohtisuorassa olevassa suunnassa. Kvartsiitin suuri kimmomoduli johtuu kvartsista muodostuvasta mineraalikoostumuksesta, jolloin kivi on hyvin kovaa. Suureen kimmomoduliarvoon on vaikuttanut ilmeisesti myös kvartsimineraalien liittyminen toisiinsa lujilla, mutkikkailla raerajoilla.

Usmin gabron melko suuren kimmomoduliarvoon vaikuttaa kiven mineraalikoostumus, mineraalien pieni raekoko sekä mineraalien lomittaisesta esiintymisestä johtuva luja rakenne.

Koska kimmomoduliarvo riippuu paljon kiven rakenteesta eikä se ilmoita kiven kovuutta, ei pelkän kimmomoduliarvon perusteella voida määritellä kiven kulutuskestävyyttä.

9.2 Puristusmurtolujuus

Näyte kivistä suurimmat puristusmurtolujuusarvot saivat Rytylin kvartsiitti, Koskenkylän tonaliitti ja Usmin gabro (taulukko 12). Suureen puristusmurtolujuuteen on vaikuttanut kiviaineksien pieni mineraalien raekoko, mineraalien luja sitoutuminen toisiinsa sekä melko homogeeninen, luja rakenne. Ilmeisesti kvartsiitin suureen arvoon vaikuttaa myös päämine-

raalina olevan kvartsin (97% mineraalikoostumuksesta) huono lohkeavuus sekä kvartsimineraalien liittyminen toisiinsa kiinteillä, mutkikkailla raerajoilla.

Kvartsiitilla puristusmurtolujuus oli kerroksellisuuden suunnassa 16% suurempi kuin tätä vastaan kohtisuorassa olevassa suunnassa.

Paapanluhdanmäen amfiboliitilla puristusmurtolujuus oli liuskeisuuden suunnassa noin 40% suurempi kuin tätä vastaan kohtisuorassa olevassa suunnassa. Suuri lujuusero johtuu ilmeisesti mineraalien yhdenmukaisesti suuntautuneisuudesta. Tällöin kivellä on hyvin erilaiset lujusominaisuudet eri suunnissa.

Isotalon kiillegneissin pieni puristusmurtolujuus johtuu ainakin osittain kiven heterogeenisistä, gneissimäisestä rakenteesta sekä valmiiksi rikkonaisista porfyyrisistä granaattirakeista.

Vehmaan ja Mustion graniitin ja Nummenojan kvartsidioriitin pieniin murtolujuusarvoihin vaikuttaa ilmeisesti suuri mineraalien raekoko ja erikoisesti Mustion graniitilla näytteissä olleet porfyyriset hajarakeet.

Koskenkylän tonaliittinäytteiden hajontaan (liite 5 (3)) on vaikuttanut näytteessä n:o 3 ollut mikrorako, jolloin näytteen murtolujuus on muita selvästi pienempi.

Laboratoriotuloksien tilastollisien käsittelyjen perusteella (luku 11.2) kiven puristusmurtolujuus antaa viitteitä kiven kulutuskestävyydestä.

Taulukko 12. Yksiaksiaalisen puristusmurtolujuuskokeen tulokset.

Kiviaines	Ottopaikka	Puristusmurtolujuus (MPa)
Kvartsiitti (kerroksell.suunn.)	Rytyli	387,30
Kvartsiitti (kohtisuor.kerr.suunn.)	"	335,50
Tonaliitti	Koskenkylä	324,40
Gabro	Usmi	242,00
Tuffiitti	Rippu	203,90
Amfiboliitti (liuskeisuuden suunn.)	Paapanluhdanmäki	226,50
Amfiboliitti (kohtisuor.lius.suunn.)	"	163,80
Kvartsidioriitti	Nummenoja	164,40
Graniitti	Mustio	162,90
Granodioriitti	Ilvesvuori	159,60
Graniitti	Vehmaa	146,02
Kiillegneissi	Isotalo	120,00
	Keskiarvo	219,69
	Keskihajonta	86,15

9.3 Pistekuormitusindeksi

Pistekuormituskokeessa parhaat eli suurimmat pistekuormitusarvot saivat Koskenkylän tonaliitti, Usmin gabro sekä Rytylin kvartsiitti. Suureen pistekuormitusarvoon ovat vaikuttaneet kiviaineksien mineraalien pieni raekoko, kiven homogeenisuus ja mineraalien luja sitoutuminen toisiinsa.

Isotalon kiillegneissin pieneen pistekuormitusarvoon on vaikuttanut lähinnä kiven heterogeeninen, gneissimäinen rakenne sekä suuret porfyysiset hajarakeet. Nummenojan kvartsidioriitin ja Vehmaan graniitin pieneen arvoon on vaikuttanut mineraalien suuri raekoko sekä mineraalien heikko kiinnittyminen toisiinsa.

Pistekuormitusindeksi (sekä Is(32) että Is(50)) kuvastaa pitkälti samaa ominaisuutta puristusmurtolujuuden kanssa, sillä kokeiden tuloksien välinen korrelaatio on melko suuri ($r=0,76$, liite 6).

Taulukossa 13 on esitetty läpimitaltaan 32 mm olevista kairanäytteistä määritettyjen indeksiarvojen Is(32) lisäksi yleisemmin käytettävät Is(50)-arvot. Tuloksien tilastollisissa käsittelyissä on käytetty vain Is(50)-arvoja.

Taulukko 13. Pistekuormitusindeksi Is(32):n ja Is(50):n tulokset.

Kiviaines	Ottopaikka	Pistekuormitusindeksi (MPa)	
		Is32	Is50
Tonaliitti	Koskenkylä	18,90	13,50
Gabro	Usmi	18,00	12,00
Kvartsiitti (kerroksell.suunn.)	Rytyli	17,00	11,50
Kvartsiitti (kohtisuor.kerr.s.)	"	16,00	11,30
Tuffiitti	Rippu	15,20	10,67
Graniitti	Mustio	14,20	10,00
Granodioriitti	Ilvesvuori	14,00	9,85
Amfiboliitti (liuskeisuuden suunn.)	Paapanluhdanmäki	11,50	8,11
Amfiboliitti (kohtisuor.lius.s.)	"	10,10	7,23
Graniitti	Vehmaa	10,90	7,30
Kvartsidioriitti	Nummenoja	10,00	7,20
Kiillegneissi	Isotalo	9,60	6,80
	Keskiarvo	13,78	9,62
	Keskihajonta	3,31	2,25

Laboratoriokokeiden tuloksien tilastollisien käsittelyjen perusteella kiven pistekuormitusindeksin avulla voidaan arvioida kiven kulutuskestävyyttä (luku 11.2).

9.4 Porausnopeusindeksi

Porausnopeusindeksi (PNI) on määritetty haurausarvo S20':n ja poranterän tunkeutumaa ilmoittavan Sieversin J'-arvon perusteella. Haurausarvo S20' on saatu Porotodyakonovin pudotuslaitteella kairasydännäytteestä määritetystä Proto 20'-arvosta.

Taulukko 14. Porausnopeusindeksi (PNI)-arvot

Kiviaines	Ottopaikka	Porausnopeusindeksi
Amfiboliitti (liuskeisuuden suunn.)	Paapanluhdanmäki	56,20
Amfiboliitti (kohtisuor.lius.s.)	"	45,00
Graniitti	Vehmaa	51,40
Kiillegneissi	Isotalo	50,00
Kvartsidioriitti	Nummenoja	48,60
Graniitti	Mustio	48,00
Tuffiitti	Rippu	41,00
Kvartsiitti (kerroksell.suunn.)	Rytyli	40,03
Kvartsiitti (kohtisuor.kerr.s.)	"	40,00
Granodioriitti	Ilvesvuori	36,40
Tonaliitti	Koskenkylä	36,00
Gabro	Usmi	34,00
	Keskiarvo	43,89
	Keskihajonta	7,01

Kivellä on pieni porausnopeusindeksi kun sillä on sekä pieni haurausarvo ($S'20$) että pieni Sieversin J' -arvo. Pieni porausnopeusindeksiarvo on yleensä hienorakeisilla, lujan rakenteen omaavilla (ns. tiiviisti kutoutuneilla) homogeenisillä kivillä, joissa esiintyy tasaisesti sitkeitä/pehmeitä tai runsaasti hyvin kovia mineraaleja.

Suurimmat porausnopeusindeksiarvot saivat Paapanluhdanmäen amfiboliitti, Vehmaan graniitti ja Isotalon kiillegneissi (taulukko 14). Amfiboliitin suureen indeksiarvoon on vaikuttanut kiven pehmeystä ja mineraalien yhdenmukaisesta suuntauksesta johtuva suuri Sieversin J' -arvo. Erikoisesti liuskeisuuden (=venymä) suunnassa Sieversin J' -arvo on amfiboliitilla hyvin suuri eli näytettä on laboratorioporalla ko. suunnassa helppo porata.

Vehmaan graniitilla suuri arvo johtuu suuresta haurausarvosta.

Kiillegneissillä kiven hauraus ja pehmeiden kiillem mineraalien kasaumat saavat aikaan suuren porausnopeusindeksiarvon.

Usmin gabronäytteen pieni porausnopeusindeksiarvo johtuu hyvästä iskunkestävyydestä eli pienestä haurausarvosta sekä melko pienestä Sieversin J' -arvosta.

Koskenkylän tonaliitilla molemmat arvot ovat melko pienet, jolloin indeksiarvokin on pieni.

Porausnopeusindeksi ei sellaisenaan sovellu kiviaineksen kulutuskestävyyden indikaattoriksi, sillä indeksiarvoon vaikuttava haurausarvo (iskunkestävyys) voi olla pieni sekä kulu- tusta hyvin kestävillä kovilla että sitkeillä kivillä. Sitkeät kivet ovat kuitenkin useimmiten samalla pehmeitä, joten ne eivät kestä hyvin raapivaa kulutusta. Poraustapahtumaan vaikuttaa lisäksi hyvin moni muuttuja (poranterän kunto, porausreiässä oleva kiviaines, porauskohdan valinta, porausteho, kuormitus, kiven koostumus ja rakenne, jne.), joiden vaikutuksesta porausnopeus vaihtelee /43/.

9.5 Mineraalien raekoko

Ohuthieistä määritettyjen päämineraalien keskimääräisen raekoon perusteella koemateriaalina käytetyistä kallionäytteistä suurirakeisimpia ovat Vehmaan ja Mustion graniitti sekä Nummenojan kvartsidioriitti. Hienorakeisimpia ovat Koskenkylän tonaliitti, Ripun tuffiitti ja Paapanluhdanmäen amfiboliitti (taulukko 15). Amfiboliitin raekoko on todellisuudessa esitettyä hieman suurempi (noin 0,5-1,0 mm), sillä raekoon määrittäminen on tehty ohuthiestä, joka on valmistettu kohtisuoraan venymää vastaan.

Soramurskemateriaalista mineraalien raekokomäärittäminen on tehty silmämääräisesti, koska soramateriaalista ei valmistettu ohuthiettä. Soramurskeella mineraalien raekoko vaihtelee aineksen heterogeenisyydestä johtuen paljon.

Taulukko 15. Koekiviaineksien keskimääräinen ja maksimi-raekoko.

Kiviaines	Ottopaikka	Päämine- raalien keskim. raekoko (mm)	Maksimi- raekoko (mm)	Maksimi- raekokoa olevien rakeiden määrä(kpl)/ 10cm ²
Graniitti	Vehmaa	3,50	8,00	5
Kvartsidioriitti	Nummenoja	2,00	7,00	6
Graniitti	Mustio	2,00	7,00	10
Gabro	Usmi	1,50	3,20	1
Kiillegneissi	Isotalo	1,30	3,60	2-30
Soramurske	Nukari	0,70	10,00	-
Kvartsiitti	Rytyli	0,60	1,80	-
Granodioriitti	Ilvesvuori	0,33	3,00	5-8
Amfiboliitti				
(kohtisuor.lius.)Paapanluh-				
	danmäki	0,30	1,00	-
Tuffiitti	Rippu	0,24	3,60	0-50
Tonaliitti	Koskenkylä	0,17	1,00	-
	Keskiarvo	1,15	4,47	

Vehmaan graniitissa, Nummenojan kvartsidioriitissa ja Usmin gabrossa yksittäisiä keskiraekokoa suurempia mineraaleja esiintyy harvakseltaan tasaisesti. Muissa kiviaineksissa suuria hajarakeita esiintyy vaihtelevasti. Erikoisesti Isotalon kiillegneississä, Ilvesvuoren granodioriitissa ja Ripun tuffiitissa hajarakeita on paikoitellen tiheinä ryhminä. Koska hajarakeiden esiintymistiheyden määrittäminen tehtiin yhtenäiseltä kivipinnalta (noin 20x20 cm) silmämääräisesti arvioiden, ei hienorakeisista kiviaineksista kooltaan pienien (hajarakeiden koko alle 2 mm) hajarakeiden esiintymistiheyttä voitu määrittää.

9.6 Vickersin kovuus

Ohuthieistä määritetyn Vickersin kovuuden (VHK) perusteella kovimpia kiviä ovat Rytylin kvartsiitti, Koskenkylän tonaliitti ja Vehmaan graniitti. Koemateriaalista pehmeimpiä ovat Paapanluhdanmäen amfiboliitti, Usmin gabro ja Nummenojan kvartsidioriitti (taulukko 16). Soramurskeesta ei määritetty Vickersin kovuutta laisinkaan.

Taulukko 16. Koekiviaineksien Vickersin kovuudet.

Kiviaines	Ottopaikka	VHK
Kvartsiitti	Rytyli	1030
Tonaliitti	Koskenkylä	869
Graniitti	Vehmaa	842
Kiillegneissi	Isotalo	836
Graniitti	Mustio	817
Granodioriitti	Ilvesvuori	790
Tuffiitti	Rippu	781
Kvartsidioriitti	Nummenoja	772
Gabro	Usmi	705
Amfiboliitti	Paapanluhdanmäki	674
	Keskiarvo	811,6

Erikoisesti heterogeenisen Isotalon kiillegneissin Vickersin kovuus voi vaihdella sen mukaan, mistä kohtaa näytettä ohuthie on valmistettu.

Vickersin kovuus osoittaa hioutuvuusluvun tavoin kiven kovuuden. Hioutuvuusluku- ja Vickersin kovuusarvojen välinen korrelaatio onkin melko suuri ($r=0,85$, liite 6). Verrattaessa menetelmien luotettavuutta toisiinsa osoittaa hioutuvuusluku paremmin koko kiviaineksen kovuutta, sillä Vickersin kovuus määritetään noin 10 x 10 mm:n kokoisesta ohuthiestä. Hioutuvuuskokeessa kovuus määräytyy huomattavasti suuremalta kivi-pinta-alalta.

10. TULOKSIEN VIRHETEKIJÄT

Kiviaineksien Tröger- ja VTT:n poranäytteen kulutuskokeet tehtiin kokeen hankaluudesta (näytteen kairaus, valmistaminen ja kokeen suoritus) johtuen vain yksistä kivitappaleista, joten tuloksissa voi olla pienestä otoksesta johtuvaa virhettä. Samoin hioutuvuus- ja parannetun haurausarvokokeen tuloksissa voi vähäisestä näytemäärästä johtuen esiintyä virheellisyyttä. Yleensäkin lujuus- ja kulutuskokeet, jotka tehdään suuresta näytemäärästä (esim. Los Angeles-kokeessa näytettä 5 kg) tai useista koekappaleista antavat materiaalista aina yksittäisiä näytteitä tai pientä näytemäärää luotettavamman tuloksen.

Kalliomekaanisissa tutkimuksissa kimmomoduli-, Poissonin luku- ja puristusmurtolujuusmääritykset tehtiin läpimitaltaan Suomessa kalliomekaanisissa tutkimuksissa yleisimmin käytävistä 32 mm:n kairasydännäytteistä. ISRM:n suosituksen mukaan kokeet tulisi tehdä vähintään läpimitaltaan 54 mm:n kairasydämistä. Pienempien koekappaleiden koetulokset saattavat poiketa hieman suuremmilla kappaleilla saaduista arvoista. Tulokset ovat kuitenkin keskenään vertailukelpoisia.

ISRM:n suosituksien mukaan näytteiden läpimitta tulisi olla 10 x suurimman mineraalin läpimitta. Tällöin suurimmat virheet olisivat karkearakeisimmilla näytteillä eli Vehmaan ja Mustion graniiteilla, Isotalon kiillegneissillä sekä Nummenojan kvartsidioriitilla.

Kairanäytteistä tehdyissä määrityksissä näytekappaleet valittiin siten, että niissä ei olisi esiintynyt havaittavia mikrorakoja tai muita virheitä.

Sieversin J' -arvoon vaikuttaa erikoisesti epähomogeenisilla kivillä porauskohdan valinta, sillä poranterän leveys on vain 8,5 mm.

11. KOETULOKSIEN TARKASTELU

11.1 Tiepäällysteisiin soveltuvat kiviainekset

Laboratoriokokeiden tuloksien perusteella (liite 4) osoittautuivat koemateriaaleista parhaiten kulutusta kestäviksi Koskenkylän tonaliitti, Rytylin kvartsiitti ja Nukarin soramurske. Nämä kiviainekset kestävät hyvin sekä äkillisiä iskuja että raapivaa hiontaa.

Koskenkylän tonaliitin jälkeen seuraavaksi parhaiten erikoisesti iskuja kestävät Usmin gabro sekä Paapanluhdanmäen amfiboliitti. Nämä kiviainekset eivät kuitenkaan pehmeydestä johtuen kestä raapivaa hiontaa.

Raapivaa hiontaa kestävät Koskenkylän tonaliitin ja Rytylin kvartsiitin jälkeen seuraavaksi parhaiten kaikki graniittiset kiviainekset eli Mustion graniitti, Nukarin soramurske (noin 60 % graniittia) sekä Vehmaan graniitti.

Iskunkestävyydeltään heikoimpia ovat Vehmaan graniitti ja Isotalon kiillegneissi.

Nukarin soramurskenäytteen hyvä kulutuskestävyys johtuu runsaasta kulutusta hyvin kestävästä hienorakeisesta, graniittisesta kivimateriaalista, elastisesta kiilleliuske- ja -gneisimateriaalista sekä osittain luonnonpintaista, pyöreistä kiviraepinnoista.

Kalliomekaanisien lujuusominaisuuksien (porausnopeusindeksi (PNI), pistekuormitusindeksi, veto- ja puristusmurtolujuus, Sieversin J'-arvo, Proto 20'- ja S-20'-haurausarvot) perusteella lujimpia kiviä ovat Koskenkylän tonaliitti, Rytylin kvartsiitti ja Usmin gabro. Lujuudeltaan heikoimpia ovat kalliomekaanisien lujuusominaisuuksien perusteella Paapanluhdanmäen amfiboliitti ja Isotalon kiillegneissi.

Suoritettujen laboratoriokokeiden perusteella kulutusta, joka koostuu sekä iskuista että raapivasta hionnasta kestävät ehjät, hienorakeiset, suuntautumattomat tai vain heikosti suuntautuneet kiviainekset, jotka koostuvat pääosin kovista mineraaleista (Mohsin asteikolla kovuus yli 5 kuten kvartsi-, maasälpä- ja pyrokseenimineraalit). Erikoisesti iskunkestävyyden kannalta kiviaineksessa tulee kovien mineraalien joukossa olla tasaisesti myös sitkeitä tai pehmeitä mineraaleja (noin 5-20%).

Kiviaineksen rakenteellista lujuutta ja kulutuskestävyyttä lisää erikoisesti iskunkestävyyden osalta mineraalien hieman vaihteleva raekoko sekä mineraalien lomittaisesta sijainnista johtuva rakenne.

Teiden päällystekiviaineksiksi soveltuvat huonosti heterogeeniset karkearakeiset kiviainekset (mineraalien raekoko yli 5 mm), joissa pehmeät ja helposti lohkeavat mineraalit ovat ryhmittyneet selvästi ryhmiksi tai vyöhykkeiksi.

Pehmeitä ja usein samalla helposti rapautuvia kiviaineksia ei huonosta raaputuskestävyydestä johtuen voida pitää teiden päällystemateriaaleiksi sopivina kiviaineksina.

11.2 Tiepäällystekiviaineksien testaamiseen soveltuvat koemenetelmät

Laboratoriokokeiden tulosaineiston perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä myös teiden päällystekiviaineksien lujuuden ja kulutuskestävyyden testaamiseen soveltuvista koemenetelmistä. Tätä tarkoitusta varten tässä tutkimuksessa laboratoriokokeiden tuloksia on tilastollisia menetelmiä käyttäen verrattu kiviaineksien hioutuvuusluvun ja parannetun haurausarvon eri yhdistelmiin.

Näiden yhdistelmien käyttö kulutuskestävyyden vertailuperusteena johtuu siitä, että useissa laboratorio-, koerata- ja teiden päällysteiden kulumistutkimuksissa päällysteiden kulumisen on todettu korreloivan erittäin hyvin päällysteissä käytetyn kiviaineksen hioutuvuusluvun ja (parannetun) haurausarvon yhdistelmän kanssa /5,6,8,13,31/.

Koska tässä tutkimuksessa koemateriaalina käytetyistä kiviaineksista valmistetut tiepäällysteet poikkesivat huomattavasti toisistaan (massatyyppi, sideaine, sideaine- ja filleripitoisuus, maksimiraekoko, jne. vaihtelevat), ei päällysteiden kulumisarvoja olisi voinut verrata luotettavasti toisiinsa.

Verrattaessa päällystekiviaineksien kulutuskestävyyttä päällysteiden kulumisarvojen perusteella toisiinsa tulisi kulusolosuhteiden, päällystemassojen suhteutuksien sekä sideaineen ja kiviaineksen välisien tartuntaominaisuuksien olla mahdollisimman samanlaisia. Tällöin muuttuvana tekijänä olisi vain kiviaines.

Koska nastarengasliikenteessä nastojen iskujen ja raapaisujen osuudet tie- ja liikennetekijöistä riippuen vaihtelevat, kiviaineksien kulutuskestävyyttä on tässä tutkimuksessa verrat-

tu parannetun haorausarvon ja hioutuvuusluvun kolmeen eri yhdistelmään:

$$1) \text{ parannettu haorausarvo } \times \sqrt{\text{hioutuvuusluku}}$$

$$2) \text{ hioutuvuusluku } \times \sqrt{\text{parannettu haorausarvo}}$$

$$3) \text{ hioutuvuusluku } \times \text{ parannettu haorausarvo}$$

Erikoisesti yhdistelmän 1) parannettu haorausarvo $\times \sqrt{\text{hioutuvuusluku}}$ on todettu korreloivan päällysteen kulumisen kanssa olosuhteissa, joissa ajoneuvot käyttävät suuria tasaisia ajonopeuksia. Tällöin vallitsevana kulutusta aiheuttavana tekijänä on nastan isku /8,13/.

Yhdistelmän 2) hioutuvuusluku $\times \sqrt{\text{parannettu haorausarvo}}$ on todettu korreloivan päällysteen kulumisen kanssa erikoisesti olosuhteissa, joissa päällysteeseen kohdistuu runsaasti nastojen raapivaa hiontaa. Nastan raapaisuja kohdistuu tien pintaan erikoisesti ajoneuvojen kiihdytyksissä, jarrutuksissa ja kaarreaajossa /8,13/.

Eräissä tutkimuksissa /5,31/ pelkän hioutuvuusluku \times parannettu haorausarvo-yhdistelmän on todettu kuvaavan parhaiten tiepäällysteen kulumista. Tästä johtuen myös tämä yhdistelmä on otettu yhdeksi vertailukohteeksi.

Laboratoriokokeiden tulosaineiston tilastolliset analyysit on tehty TVH:n talousosaston Wang-tietokoneella käyttäen Survo-76 tilastollisia laskentaohjelmia.

Lineaariset korrelaatiot on laskettu kaikkien eri koemenetelmillä saatujen tuloksien välille. Kaikkien muuttujien väliset korrelaatiot on esitetty liitteissä 6 ja 7 olevissa korrelaatiomatriiseissa.

Usean muuttujan regressioanalyysissä riippuvana eli selitettävänä muuttujana on käytetty em. hioutuvuusluvun ja parannetun haorausarvon erilaisia yhdistelmiä. Riippumattomina eli selittävinä muuttujina on käytetty muita koetuloksia.

Regressioanalyysin avulla on valittu tilastollinen malli, joka mahdollisimman hyvin kuvaa selitettävää muuttujaa. Mallin löytämiseksi on tietokoneessa käytetty usean muuttujan ns. askeltavaa regressioanalyysi (step reg)-ohjelmaa. Ohjelma valitsee selittäjämuuttujien joukosta sopivia muuttujia joko lisäämällä tai poistamalla mallista selittäjän kerrallaan. Lisättävän tai poistettavan selittäjän ohjelma valitsee F-testin perusteella.

Regressioanalyysillä saadaan malli, joka on muotoa

$$y = a + b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \text{ missä}$$

y = selitettävä muuttuja

b_0, b_1, \dots, b_n = kerroinestimaatti

x_1, x_2, \dots, x_n = selittävä muuttuja

Saatujen mallien luotettavuutta on kuvattu selitysasteella (r^2), joka tässä tutkimuksessa hyväksytyillä malleilla on yleensä suurempi kuin 0,80. Yksittäisien kerroinestimaattien luotettavuutta ilmentävät regressioanalyysiohjelman laskemat t-testiarvot, jotka hyväksytyissä malleissa ovat yleensä tilastollisesti melkein merkitseviä (merkitsevyystaso 0,05), merkitseviä (merkitsevyystaso 0,01) tai erittäin merkitseviä (merkitsevyystaso 0,001).

Parhaana usean muuttujan regressioanalyysillä saatuna mallina pidetään mallia, joka kuvaa kiven lujuutta realistisesti ja jossa on vain muutama muuttuja sekä mallilla on mahdollisimman suuri selitysaste. Lopullisien mallien muuttujiksi eli koemenetelmiksi on haluttu sellaisia menetelmiä, jotka tiepäälysteisiin tarkoitettun kiviaineksen rutiininomaisissa tutkimuksissa olisivat helppoja ja nopeita suorittaa. Muuttujien määrässä ei ole määrätietoisesti haluttu päästä vain yhteen muuttujaan, koska yhden koetuloksen ei katsota varmuudella kuvastavan kiven todellista kestävyyttä.

11.2.1 Selitettävänä muuttujana yhdistelmä parannettu haurausarvo x $\sqrt{\text{hioutuvuusluku}}$

Koemateriaalina käytetyillä kiviaineksilla yhdistelmän (parannettu haurausarvo x $\sqrt{\text{hioutuvuusluku}}$) kanssa korreloivat parhaiten yksittäisistä koementelmistä (liite 6):

1) keskiraekoko	$r = 0,798$
2) pistekuormitusindeksi $I_s(50)$	$r = 0,772$
3) puristusmurtolujuus (σ_{pm})	$r = 0,693$
4) porausnopeusindeksi (PNI)	$r = 0,663$

Eri muuttujien välisien korrelaatioiden tarkastelusta, kuten myös selitettävää muuttujaa kuvaavaa mallia etsittäessä on jätetty pois Proto 20', haurausarvo S20', parannettu haurausarvo, Los Angeles-luku, hioutuvuusluku sekä pistekuormitusindeksi $I_s(32)$. Kaksi ensinmainittua ovat vastaavia kokeita kuin parannettu haurausarvokoe. Parannettu haurausarvo ja hioutuvuusluku ovat jo verrattavassa muuttujayhdistelmässä. Pistekuormitusindeksi $I_s(50)$ on määritetty pistekuormitusindeksin $I_s(32)$ mukaisesti. Los Angeles-luku on jätetty pois, koska se ilmentää kiviaineksessa samaa asiaa kuin parannettu haurausarvo (Los Angeles-kokeen ja p-haurausarvokokeen tuloksien välinen korrelaatio $r = 0,98$). Tilastollisessa tarkastelussa ovat näin ollen mukana kimmomoduli, Poissonin luku, puristus- ja vetomurtolujuus, pistekuormitusindeksi $I_s(50)$, Vickersin kovuus, Sieversin J'-arvo, porausnopeusindeksi, Tröger-kulutuskoe, maksimi- ja keskiraekoko, muotoarvot ja poranäytteen kulutuskoe.

Usean muuttujan regressioanalyysillä saatiin selitettävää muuttujaa kuvaamaan parhaiten malli, jossa muuttujina ovat

vetomurtolujuus (σ_{vm}), keskiraekoko ja pistekuormitusindeksi ($Is(50)$) eli

$$p\text{-haurausarvo} \times \sqrt{\text{hioutuvuusluku}} =$$

$$1) \quad \begin{array}{ccccccc} 32,4 & + & 1,0 & (\sigma_{vm}) & + & 4,9 & (\text{keskiraekoko}) & - & 2,3 & (Is(50)) \\ (7,0) & & (2,4) & & & (6,0) & & & (5,6) \end{array}$$

$$r^2 = 0,93, \quad r = 0,96$$

Kerroinestimaattien t-testiarvot (suluissa olevat luvut) ovat vetomurtolujuutta lukuun ottamatta erittäin merkitseviä. Vetomurtolujuuden kertoimen merkitsevyystaso on 0,05 eli kerroin on tilastollisesti melkein merkitsevä.

Jätettäessä selittäjien joukosta pois muuttuja vetomurtolujuus (σ_{vm}) mallin selitysaste ei ratkaisevasti heikkene eli

$$p\text{-haurausarvo} \times \sqrt{\text{hioutuvuusluku}} =$$

$$2) \quad \begin{array}{ccccccc} 38,4 & + & 4,1 & (\text{keskiraekoko}) & - & 1,7 & (Is(50)) \\ (8,4) & & (4,5) & & & (4,6) \end{array}$$

$$r^2 = 0,88, \quad r = 0,94$$

(Kerroinestimaatit ovat kaikki tilastollisesti merkitseviä.)

Jätettäessä selittäjien joukosta pois vielä muuttuja keskiraekoko mallin selitysaste heikkenee jo huomattavasti eli

$$p\text{-haurausarvo} \times \sqrt{\text{hioutuvuusluku}} =$$

$$3) \quad \begin{array}{ccccccc} 50,6 & - & 2,5 & (Is(50)) \\ (7,8) & & (3,8) \end{array}$$

$$r^2 = 0,60, \quad r = 0,77$$

(Kerroinestimaatit ovat molemmat tilastollisesti merkitseviä.)

Kolmannen mallin (3) selityssaste ei ole riittävän hyvä. Se-
littäjän keskiraekoko lisääminen parantaa mallia selvästi,
joten muuttujien lukumäärän ja mallin selityssasteen huomioon
ottaen toinen (2) malli on paras.

Karsimalla tuloksista muista kiviaineksista mineraalikoostu-
muksen tai kiven rakenteen puolesta poikkeavien kiviaineksien
tulokset (Usmin gabro (15), Ripun tuffiitti (9) ja Paapanluh-
danmäen amfiboliitti (10a ja 10b)) pyritään homogeenisemmalla
aineistolla saamaan esille itse koemenetelmien merkitsevyys
heterogeenistä aineistoa paremmin. Liitteessä 8 on esitetty
lineaariset regressiot selitettävän muuttujan ja koko koe-
aineistolla parhaiten korreloivien koetuloksien välille.

Karsitulla aineistolla parhaat korrelaatiot eri koemenetelmi-
en ja yhdistelmän (p-haurausarvo $\times \sqrt{\text{hioutuvuusluku}}$) välillä
ovat:

1) keskiraekoko	$r = 0,924$
2) pistekuormitusindeksi $Is(50)$	$r = 0,898$
3) porausnopeusindeksi (PNI)	$r = 0,892$
4) kimmomoduli (E)	$r = 0,806$

Usean muuttujan regressioanalyysillä saatiin selitettävää
muuttujaa kuvaamaan parhaiten malli, jossa muuttujina ovat
vetomurtolujuus (σ_{vm}), maksimiraekoko, keskiraekoko ja piste-
kuormitusindeksi ($Is(50)$) eli

$$\text{p-haurausarvo} \times \sqrt{\text{hioutuvuusluku}} =$$

$$1) \quad 36,2 + 0,6 (\sigma_{vm}) - 1,0 (\text{maksimiraekoko}) + 7,2 (\text{keski-} \\ (44,3) \quad (11,1) \quad (11,6) \quad (37,2) \\ \text{raekoko}) - 2,1 (Is(50)) \\ (42,5)$$

$$r^2 = 0,99 \quad r = 0,99$$

(Kerroinestimaatit ovat kaikki tilastollisesti erittäin merkitseviä.)

Jätettäessä selittäjien joukosta pois muuttujat vetomurtolujuus ja maksimiraekoko saatiin malli, jossa muuttujina ovat keskiraekoko ja pistekuormitusindeksi eli

$$p\text{-haurausarvo} \times \sqrt{\text{hioutuvuusluku}} =$$

$$2) \quad \begin{array}{ccc} 38,4 & + & 4,6 \text{ (keskiraekoko)} & - & 1,8(\text{Is}(50)) \\ (8,0) & & (5,4) & & (4,5) \end{array}$$

$$r^2 = 0,97 \qquad r = 0,99$$

(Kerroinestimaatit ovat kaikki tilastollisesti merkitseviä.)

Muuttujien maksimiraekoko ja vetomurtolujuus poisjättäminen ei merkittävästi heikennä mallin selitysastetta. Tällöin toinen (2) malli on muuttujien lukumäärän ja selitysasteen huomioon ottaen paras.

Käytettäessä selitettävän muuttujan kuvaamisessa joko kaikkien kiviaineksien laboratoriotuloksia tai vain supistetun aineiston tuloksia päädyttiin samaan malliin, jossa selittävinä muuttujina ovat keskiraekoko ja pistekuormitusindeksi (Is(50)).

11.2.2 Selitettävänä muuttujana yhdistelmä hioutuvuusluku $\times \sqrt{\text{parannettu haurausarvo}}$

Koemateriaalina käytetyillä kiviaineksilla yhdistelmän (hioutuvuusluku $\times \sqrt{\text{parannettu haurausarvo}}$) kanssa korreloivat yksittäisistä koemenetelmistä parhaiten (liite 6)

$$1) \quad \text{pistekuormitusindeksi (Is(50))} \qquad r = 0,841$$

$$2) \quad \text{Tröger-kulutuskoe} \qquad r = 0,772$$

- | | |
|--|-------------|
| 3) puristusmurtolujuus (σ_{pm}) | $r = 0,742$ |
| 4) Vickersin kovuus (VHk) | $r = 0,701$ |

Usean muuttujan regressionalyysillä saatiin selitettävää muuttujaa kuvaamaan vain yksi kelvollinen malli. Mallissa muuttujina ovat Vickersin kovuus (VHk) ja pistekuormitusindeksi (Is(50)) eli

$$\text{hioutuvuusluku} \times \sqrt{\text{parannettu haurausarvo}} =$$

$$\begin{array}{ccc} 23,5 - 0,1(\text{VHk}) - 0,7(\text{Is}(50)) & & \\ (10,8) \quad (3,1) & & (4,8) \end{array}$$

$$r^2 = 0,86 \qquad r = 0,93$$

(Kerroinestimaatit ovat Vickersin kovuutta (VHk) lukuun ottamatta tilastollisesti erittäin merkitseviä. Vickersin kovuuden kertoimen merkitsevyystaso on 0,01 eli tilastollisesti merkitsevä).

Karsitulla aineistolla (Usmin gabro, Ripun tuffiitti ja Paa-panluhdanmäen amfiboliitti jätetty pois) parhaat korrelaatiot eri koemenetelmien ja yhdistelmän (hioutuvuusluku $\times \sqrt{\text{parannettu haurausarvo}}$) välillä ovat

- | | |
|--|-------------|
| 1) pistekuormitusindeksi (Is(50)) | $r = 0,972$ |
| 2) kimmokerroin (E) | $r = 0,848$ |
| 3) porausnopeusindeksi (PNI) | $r = 0,807$ |
| 4) puristusmurtolujuus (σ_{pm}) | $r = 0,799$ |
| 5) Tröger-kulutuskoe | $r = 0,799$ |

Tällöin usean muuttujan regressioanalyysillä saatiin selitettävää muuttujaa kuvaamaan malli, jossa muuttujana on vain pistekuormitusindeksi ($I_s(50)$) eli

$$\text{hioutuvuusluku} \times \sqrt{\text{parannettu haurausarvo}} =$$

$$\begin{array}{l} 19,0 - 1,1 \text{ (} I_s(50) \text{)} \\ (18,6) \text{ (} 10,3 \text{)} \end{array}$$

$$r^2 = 0,95 \qquad r = 0,97$$

(Kerroinestimaatit ovat tilastollisesti erittäin merkitseviä.)

Käytettäessä selitettävän muuttujan kuvaamisessa kaikkien kiviaineksien laboratoriotuloksia saatiin malliin muuttujiksi kiven Vickersin kovuus (VHK) ja pistekuormitusindeksi. Karsitulla aineistolla malliin tuli vain pistekuormitusindeksi.

11.2.3 Selitettävänä muuttujana yhdistelmä

hioutuvuusluku \times parannettu haurausarvo

Kaikilla koemateriaalina käytetyillä kiviaineksilla yhdistelmän (hioutuvuusluku \times parannettu haurausarvo) kanssa korreloivat eri koemenetelmistä parhaiten (liite 6)

1) pistekuormitusindeksi ($I_s(50)$)	$r = 0,856$
2) puristusmurtolujuus (σ_{pm})	$r = 0,758$
3) porausnopeusindeksi (PNI)	$r = 0,692$
4) keskiraekoko	$r = 0,650$

Usean muuttujan regressioanalyysillä saatiin selitettävää muuttujaa kuvaamaan parhaiten malli, jossa muuttujina ovat

vetomurtolujuus (σ_{vm}), keskiraekoko ja pistekuormitusindeksi ($Is(50)$) eli

hioutuvuusluku x parannettu haurausarvo =

$$1) \quad 58,7 + 2,5 (\sigma_{vm}) + 6,4 (\text{keskiraekoko}) - 5,3 (Is(50))$$

$$(8,1) \quad (3,7) \quad (5,0) \quad (8,4)$$

$$r^2 = 0,94 \quad r = 0,97$$

(Kerroinestimaatit ovat kaikki tilastollisesti merkitseviä.)

Jättämällä selittäjien joukosta pois muuttuja vetomurtolujuus saatiin malli, jossa muuttujina ovat keskiraekoko ja pistekuormitusindeksi eli

hioutuvuusluku x parannettu haurausarvo =

$$2) \quad 74,4 + 4,6 (\text{keskiraekoko}) - 4,1 (Is(50))$$

$$(8,1) \quad (2,5) \quad (4,9)$$

$$r^2 = 0,84 \quad r = 0,92$$

(Kerroinestimaatit ovat keskiraekokoa lukuun ottamatta erittäin merkitseviä. Keskiraekoon kertoimen merkitsevyystaso on 0,01.)

Vetomurtolujuus-muuttujan poisjättäminen ei ratkaisevasti heikennä mallin luotettavuutta, joten se voidaan hankalana kokeena jättää pois selittäjien joukosta. Tällöin muuttujat keskiraekoko ja pistekuormitusindeksi yhdessä selittävät parhaiten selitettävää muuttujaa.

Supistetulla (Usmin gabro, Ripun tuffiitti ja Paapanluhdanmäen amfiboliitti jätetty pois) aineistolla korreloivat par-

haiten eri koemenetelmillä saatujen tuloksien ja yhdistelmän (hioutuvuusluku x parannettu haurausarvo) kanssa

- | | |
|-----------------------------------|-------------|
| 1) pistekuormitusindeksi $Is(50)$ | $r = 0,945$ |
| 2) porausnopeusindeksi (PNI) | $r = 0,871$ |
| 3) keskiraekoko | $r = 0,865$ |
| 4) kimmokerroin (E) | $r = 0,846$ |

Supistetulla aineistolla usean muuttujan regressioanalyysillä saatiin selitettävää muuttujaa parhaiten kuvaamaan malli, joissa muuttujina ovat vetomurtolujuus (σ_{vm}), keskiraekoko ja pistekuormitusindeksi ($Is(50)$) eli

hioutuvuusluku x parannettu haurausarvo =

- | | | | | | | | | | | |
|----|-------|---|-------|-------------------|---|-------|----------------|---|-------|--------------|
| 1) | 61,9 | + | 1,4 | (σ_{vm}) | + | 6,8 | (keskiraekoko) | - | 4,7 | ($Is(50)$) |
| | (8,2) | | (2,6) | | | (5,8) | | | (9,2) | |

$$r^2 = 0,99 \quad r = 0,99$$

(Muut kerroinestimaatit ovat tilastollisesti erittäin merkitseviä, mutta vetomurtolujuuden kertoimen merkitsevyystaso on 0,5 eli tilastollisesti melkein merkitsevä.)

Jättämällä selittäjien joukosta pois muuttuja pistekuormitusindeksi ($Is(50)$) saatiin malli, jossa muuttujina ovat vetomurtolujuus ja porausnopeusindeksi eli

hioutuvuusluku x parannettu haurausarvo =

- | | | | | | | | |
|----|--------|---|-------|-------------------|---|-------|-------|
| 2) | -197,4 | + | 6,3 | (σ_{vm}) | + | 4,0 | (PNI) |
| | (4,7) | | (3,5) | | | (6,6) | |

$$r^2 = 0,93 \quad r = 0,96$$

(Kerroinestimaatit ovat tilastollisesti merkitseviä.)

Jättämällä selittäjien joukosta hankalana kokeena pois muut-
tuja vetomurtolujuus (σ_{vm}) saatiin malli, jonka selitysaste
on muuttujien lukumäärän huomioon ottaen hyvin korkea. Täl-
löin

hioutuvuusluku \times parannettu haurausarvo =

$$\begin{array}{ccc} 3) & 74,0 + 5,5 & (\text{keskيراekoko}) - 4,4 \text{ (Is(50))} \\ & (8,5) & (3,5) \qquad \qquad \qquad (6,0) \end{array}$$

$$r^2 = 0,97 \qquad R = 0,98$$

(Kerroinestimaatit ovat tilastollisesti merkitseviä.)

Mallien selitysasteet ovat hyvin korkeita, joten malleista
voidaan parhaaksi valita viimeinen (3) malli, jossa muuttuji-
en lukumäärä on kaksi eli keskiraekoko ja pistekuormitusin-
deksi. Muuttujat keskiraekoko ja pistekuormitusindeksi ovat
menetelminä helppoja ja nopeita suorittaa.

Kaikkia selitettäviä muuttujia parhaiten kuvaavissa mal-
leissa päädyttiin koko ja supistetulla aineistolla samoihin
muuttujiin eli keskiraekokoon ja pistekuormitusindeksiin
(Is(50)). Tämän perusteella kiven pistekuormitusindeksi
yhdessä mineraalien keskimääräisen raekoon kanssa selittää
hyvin kiviaineksen kulutuskestävyyttä.

12. YHTEENVETO

Tiepäällysteet kuluvat lähes yksinomaan nastarengasliikenteen
vaikutuksesta. Nastat aiheuttavat päällysteen pintaan voimak-
kaita iskuja ja raapaisuja. Näiden seurauksena päällyste ja
siinä olevat kivirakeet vähitellen kuluvat ja rikkoutuvat.

Nastarengaskulutuksessa nastan dynaamisen iskun osuus koros-
tuu ajoneuvojen ajaessa suurella, tasaisella nopeudella. Nas-
tan raapaisu puolestaan korostuu ajoneuvojen kiihdytyksissä,
jarrutuksissa sekä ajoradan kaarteissa ja ylämäessä.

Kiven kulutuskestävyys riippuu mineraalikoostumuksesta, tekstuuritekijöistä, kiven eheydestä sekä rapautuneisuudesta.

Parhaiten nastarengasliikenteen kulutusta kestävät ehjät, rapautumattomat, hienorakeiset kiviainekset, joissa kovien mineraalien (Mohsin kovuusasteikolla yli 5) joukossa on kiven elastisuuden lisäämiseksi tasaisesti sitkeitä/pehmeitä mineraaleja (Mohsin kovuusasteikolla 3-5). Yksittäisistä mineralogisista kiven kulutuskestävyyteen vaikuttavista tekijöistä tärkeimpiä ovat mineraalien lohkeavuus ja kovuus niin, että helppo lohkeavuus heikentää ja kovuus parantaa kiven kulutuskestävyyttä. Mineraalien muodon kannalta runsaasti suorilla raerajoilla toisiinsa liittyneistä, etenkin yhdensuuntaisesti järjestyneistä mineraaleista koostuneet kivet ovat osoittautuneet kestävyydeltään usein heikoiksi. Kiven rakenteen kannalta kulutusta hyvin kestävässä kivissä hieman erisuuruiset mineraalit sijaitsevat sekaisin toistensa lomissa ilman, että ne muodostavat kiveen selviä ryhmiä.

Kiven rikkonaisuudesta, rapautuneisuudesta ja tekstuuritekijöistä kuten mineraalien muodosta, koosta, suuntautuneisuudesta sekä ryhmittymisestä riippuen kiven kulutuskestävyyttä ei voida pehmeitä kivilajeja lukuunottamatta sitoa suoraan kivilajiin. Niinpä tiepäällYTEisiin sopivia kiviaineksia voidaan saada hyvin monista magma- ja metamorfisista kivilajeista.

Suoritettujen lujuus- ja kulutuskestävyysskokeiden perusteella koemateriaalina käytetyistä kiviaineksista parhaiten nastarengasliikenteen kulutusta kestävät Koskenkylän tonaliitti ja Rytylin kvartsiitti. Heikoiten kulutusta puolestaan kestävät Vehmaan graniitti, Nummenojan kvartsidioriitti sekä Isotalon kiillegneissi.

Koekiviaineksien hyvään kulutuskestävyyteen ovat selvimmin vaikuttaneet kiven kovuus, elastisuus, homogeeninen koostumus sekä mineraalien pieni raekoko. Huonoon kulutuskestävyyteen ovat vaikuttaneet kiven pehmeys, voimakas suuntautuneisuus,

mineraalien suuri raekoko sekä erikoisesti kiillemineraalikasautumien aiheuttama heterogeenisyys.

Tiepäällysteissä käytettävän kiviaineksen kulutuskestävyyden testaamisessa tulee käyttää sekä kiven iskunkestävyyttä että raaputuslujuutta testaavia koemenetelmiä. Kiven iskunkestävyyden testaamiseen soveltuu parannettu haurausarvokoe sekä raaputuslujuuden testaamiseen hioutuvuuskoee.

Tutkittaessa tilastollisilla menetelmillä suoritettujen laboratoriokokeiden tuloksien riippuvuutta toisistaan havaittiin kiviaineksen mineraalien raekoon yhdessä kiven pistekuormitusindeksin kanssa selittävän parhaiten kiven kulutuskestävyyttä osoittavia hioutuvuusluvun ja parannetun haurausarvon eri yhdistelmiä. Tämän perusteella kiviaineksen kulutuskestävyyttä voidaan arvioida parannetun haurausarvon ja hioutuvuusluvun lisäksi myös kiven mineraalien raekoon ja pistekuormitusindeksin avulla.

KIRJALLISUUSVIITTEET

- /1/ American Society for Testing and Materials (ASTM) (1983) Standard Test Method for Resistance to Degradation of Smallsize Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. 1983 Annual Book of ASTM Standards. Section 4. Construction. Volume 04.02 Concrete and Mineral Aggregates. Printed in Easton, MD. U.S.A.
- /2/ Anttila, J. (1980) Dynaamiset nastavoimat ja niiden vaikutus tien pinnan kulumiseen. Diplomityö. Helsingin teknillinen korkeakoulu, koneinsinööriosasto, Otaniemi.
- /3/ British Standards Institution (1975) Methods for sampling and testing of mineral aggregates, sands and fillers. Part 3. Mechanical properties. B.S. 812:1973. London.
- /4/ Dørum, S. og Kristansen, K. (1981) Slitasje av dekke- og masseprøver i Trøggerapparatet. Veglaboratoriet. Intern rapport nr. 990. Gruppe C. Oslo.
- /5/ Eerola, M. ja Alkio, R. (1984) Kiviaineksen muodon vaikutus päällysteen ominaisuuksiin. VTT:n tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 449. Espoo.
- /6/ Eerola, M., Alkio, R. ja Höbeda, P. (1982) Stenmaterial för vägbeläggningar. Bestämning av slitstyrka. VTT. Tutkimuksia 55/1982. Espoo.
- /7/ Eskola, P. (1939) Kiteet ja kivet. Werner Söderström. Porvoo.
- /8/ Frostman, P., Kettunen, U-P., Larsson, R. ja Turpeinen, H. (1978) Slitageundersökningar Asfaltbetong. Samarbetet Neste-Nynäs.

- /9/ Föreningen för bituminösa beläggningar (FBB) Metodutskottet (1986) Stenmaterial. Bestämning av slipvärde. Metod MBB 31-86 (Provisorisk).
- /10/ Gaál, G., Taipale, K. ja Kähkönen, Y. (1983) Rakennusgeologian harjoituksia. Helsingin Yliopiston Geologian laitos. Geologian ja mineralogian osasto. Vasara r.y:n kurssikirjasarja n:o 2. Helsinki.
- /11/ Gantz, R. (1972) New tire-stud developments. Washington D.C. 1972. Highway Research Board. Highway Research Record. Number 418. s. 11-25.
- /12/ Gardemeister, R., Johansson, S., Korhonen, P., Patrikainen, P., Tuisku, T. ja Vähäsarja, P. (1976) Rakennusgeologisen kallioluokituksen soveltaminen. VTT:n Geotekninen laboratorio. Tiedonanto 25. Espoo.
- /13/ Grönstrand, M. (1981) Stenmaterials slitage under dubbpåfrestning och vattens inverkan därpå. Licensiatarbete. Tekniska Högskolan, avdelning för teknisk fysik. Otnäs.
- /14/ Huhtala, M. (1979) Päällysteiden plastiset deformaatiot. VTT:n tie- ja liikennelaboratorio. Tiedonanto 49. Espoo.
- /15/ Hveding, A., Dørum, S og Lofthaug, J. (1986) Vurdering av Trøggermetoden. Veglaboratoriet. Intern rapport nr. 1267. Gruppe C. Oslo.
- /16/ Höbeda, P. och Chytla, J. (1985) Undersökningar av slipvärdemetoden. Väg och Trafikinstitut (VTI). Meddelande 454. Lindköping.
- /17/ Höbeda, P., Chytla, J. och Viman, L. (1985) Ringanalys slipvärde. Väg och Trafikinstitut (VTI). Meddelande 472. Lindköping.

- /18/ International Society for Rock Mechanics (ISRM) (1981)
Rock characterization, testing and monitoring,
ISRM suggested methods. Pergamon Press. London.
- /19/ Jaeger, J. and Cook, N. (1979) Fundamentals of rock
mechanics. Menthuen. London.
- /20/ Kannisto, P., Saarinen, L., Niemi, A., Partanen, E.,
Eerola, M. ja Sistonen, M. (1979) Asfalttipäällysteiden
testausmenetelmiä, tie-menetelmät. VTT/Tie- ja
liikennelaboratorio, Tiedonanto 50. Espoo.
- /21/ Kauranne, L.K., Gardemeister, R., Korpela, E. ja
Mälkki, E. (1979) Rakennusgeologia II, 304. 2. painos.
Otakustantamo. Espoo.
- /22/ Korhonen, K-H., Gardemeister, R., Jääskeläinen, H.,
Niini, H. ja Vähäsarja, P. (1974) Rakennusalan kallio-
luokitus. Geotekninen laboratorio, Tiedonanto 12.
VTT. Otaniemi.
- /23/ Lappalainen, K. (1987) Päällysteiden kulumiskestävyyteen
vaikuttavista kiviainestekijöistä. Tie- ja Lii-
kenne. Suomen Tieyhdistyksen julkaisu 1-2/1987.
- /24/ Maijala, P.V., Niini, H. ja Riekkola, R. (1976) Kallio
rakennuskohteena. Maa- ja kalliorakennus.
S.189-222. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto.
RIL 98. K.J. Gummerus Oy. Jyväskylä.
- /25/ Manninen, E. (1984) Nurmijärven päällystekoetie v.1979-
1982. VTT. Tutkimuksia 302. Espoo.
- /26/ Niemi, A. (1985) Päällysteiden kulumiseen vaikuttavat
tekijät. VTT/Tie- ja liikennelaboratorio. Tutki-
musselostus 486. Espoo.

- /27/ Niemi, A., Huhtala, M., Oranen, L., Pelkonen, V.,
Salusjärvi, M. ja Sistonen M. (1977) Nastarengastut-
kimuksia vuosina 1973...1976. Yhteenvedo.
VTT/Tie- ja liikennelaboratorio. Tiedonanto 27.
Espoo.
- /28/ Niemi, J., Julku, T. ja Lappalainen, K. (1987) Kivi-
aineksen lujuuskokeiden vertailu päällysteen
kulutuskestävyyden arvioinnissa. Helsingin
teknillinen korkeakoulu. Louhintatekniikan
laboratorio. Espoo.
- /29/ Ollier, C. (1984) Weathering. Longman. New York.
- /30/ Pilviö, O. (1976) Veden vaikutus kiviaineksen mekaani-
seen kestävyys asfalttipäällysteessä. Kirjal-
lisuustutkimus n:o 29. Neste Oy. Tutkimuskeskus.
- /31/ Rosengren, Å. och Höbeda, P. (1977) Stenmaterial-
kvalitetens inflytande på det slitage dubbade
personbilsdäck åsamkar tät asfaltbetong HAB 16.
En faktorstudie i institutets provvägmaskin.
Statens väg- och trafikinstitut (VTI). Rapport
125. Lindköping.
- /32/ Salminen, P. (1986) Suomen malmikaivosten kivilajien
porattavuus. Diplomityö. Helsingin teknillinen
korkeakoulu, vuoriteollisuusosasto. Otaniemi.
- /33/ Salminen, P. ja Viitala, R. (1985) Rock Drillability
Study. Helsinki. University of Mining and
Metallurgy. Laboratory of Mining Engineering.
Otaniemi.
- /34/ Schumann, W. (1980) Kivet ja mineraalit värikuvina.
3. painos. Otava. Helsinki.
- /35/ Soveri, U. ja Kauranne, L.K. (1983) Rakennusgeologia I.
Suomen Rakennusgeologia 272. 5. painos. Otaku-
tamo. Espoo.

- /36/ Streckeisen, A. (1974) Classification and Nomenclature of Plutonic Rocks. Geologische Rundschau Bd 63. pp. 773-786.
- /37/ Suominen, V. (1973) Mineraalimäärittäminen. Typopress Oy. Turku.
- /38/ Särkkä, P. ja Johansson, E. (1982) Kalliomekaniikka. Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja B 29. Vuorimiesyhdistys r.y. Hangon Kirjapaino Oy. Hanko. s. 45-130.
- /39/ Tie- ja vesirakennushallitus (1987) Päällystystöiden työselitys 1987. Kunnossapitotoimisto. TVH 742802. A4 2200.
- /40/ Tröger, W.E. (1979) Optical Determination of Rock-Forming Minerals. Part 1. Determinative Tables. Stuttgart.
- /41/ Uusinoka, R. (1981) Yleinen maaperägeologia. 1. osa. Kulutusprosessit. Helsingin Yliopiston Geologian laitos. Geologian ja paleontologian osasto. Moniste n:o 2. Toinen painos. Helsinki.
- /42/ Viitala, R. ja Salminen, P. (1984) Porattavuustutkimukset Teknisessä korkeakoulussa. Vuoriteollisuus n:o 2/1984. 42. vuosikerta. s.94-98. Otaniemi.
- /43/ Visti, M. (1973) Kivilajien porattavuudesta laboratorioolosuhteissa. VTT/Geotekniikan laboratorio. Tiedonanto 6. Espoo.
- /44/ Vähäsarja, P. (1976) Sotilasgeologia II. Kallioulouhintaan liittyvää rakennusgeologiaa. Pääesikunnan koulutusosasto. Helsinki.

/45/ Weckström, L. (1974) Kiviaineksen vaikutuksesta asfaltti-
päällysteiden ominaisuuksiin Suomessa vuosina
1965-72 suoritetuista päällystystöistä saatujen
tulosten valossa. Tie- ja vesirakennushallitus.
Tiepäällystystekniikka. Julkaisu TVH 2.811.
Painovalmiste. Helsinki.

/46/ Weber, J. (1966) Petrographische Anforderungen an
Gesteinsmaterialien für Strassenbeläge und
Heissmisch Tragschichten. Strasse und Verkehr
Nr. 12/1966.

Koemateriaalina käytetyistä kiviaineksista valmistettu tiepäällyste

Kiviaines	Ottopaikka	Päällysteen valm.vuosi	Tie	Tien sijainti- kunta	Tieosuus	Päällyste- tyyppi
1. Kvartsiitti	Rytyli/ Kn-piiri	1986	Mt 870	Sotkamo	Pihlajapuro-Mustalanmutka	ÖS 18
2. Graniitti	Mustio/ U-piiri	1985	Kt 52	Tenhola	Tammisaari-Turun ja Porin läänin raja	AB 20
3. Granodio- riitti	Ilvesvuori/	1985	Mt 346	Vilppula	Innala-Mantila	KAB 18
4. Kvartsidio- riitti	Nummenoja/	1985	Mt 332	Kuru	Turun ja Porin-Kuru läänin raja	KAB 18
5. Gabro	Usmi/ U-piiri	1985	Kt 52	Helsinki, Espoo	Koko moottoritie	ABE 20
6. Graniitti	Vehmaa/ T-piiri	1973	Mt 194	Vehmaa	Ennyinen-Vehmaa	AB 20
7. Kiille- gneissi	Isotalo/ T-piiri	1985	Vt 1	Suomusjärvi, Kiikala, Kisko	Tammisilta-Ladjakoski	MPK 16
8. Tonaliitti	Koskenkylä/ U-piiri	1986	Vt 7	Porvoon mlk.	Kulloo-Rita	EAB 20
9. Tuffiitti	Rippu/ H-piiri	1986	Vt 2	Somero, Tammela,	Solkolanjärvi-Humppila	MPK 20
10. Amfi- boliitti	Paapanluh- danmäki/ V-piiri	1986	Vt 3	Laihia	Laihia-Furu	KAB 12
11. Soramurske	Nukari/ U-piiri	1979	Vt 3	Nurmijärvi	Nurmijärven koetie 1979-1983	AB 20
		1981	Vt 3	Mäntsälä	Mäntsälän koetie 1981-1985	AB 20

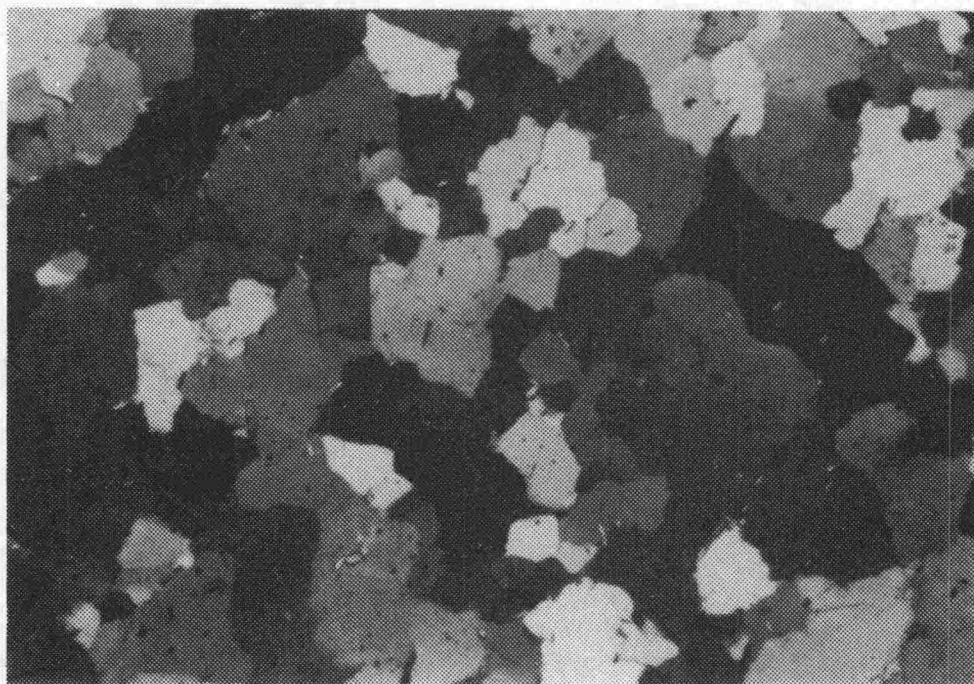
ÖS = öljysora, AB = asfalttibetoni, KAB = kevytasfalttibetoni, MPK = kuumennuspinta-asfalttibetoni. Luku 16, 18, 20 jne. päällystetyypin jäljessä tarkoittaa kivirakeiden maksimiraekokoa.

LIITE 1. Koemateriaalina käytetyistä kiviaineksista valmistettujen päällysteiden sijainti ja päällystetyyppi.

1. KVARTSIITTI (Rytyli)

Kivi on makroskooppisesti homogeenista, harmahtavanvaaleaa, keskirakeista kvartsiittia. Kiven kerroksellisuus näkyy heikona vyöhykkeellisyytenä. Sahatulla pinnalla erottuu harvakseltaan pieniä vaaleanruskehtavia rautapigmentin aiheuttamia täpliä.

Kivi koostuu lähes yksinomaan kvartsista (97%). Lisäksi kivessä on tasainen muskoviittipirote. Kvartsin raekoko on keskimäärin 0.6 mm. Muskoviitti on hienorakeisempaa (0.05 mm). Opaakkia esiintyy satunnaisesti. Lisäksi yksittäisissä kvartsirakeissa on satunnaisesti rutiilineulaisia. Kvartsirakeiden väliset rajapinnat ovat epämääräisen muotoisia. Kvartsirakeiden rajapinnoilla ei esiinny saumarakenteita. Muskoviitti on tasaisena "pirotteena" kvartsirakeiden seassa.



Rytylin kvartsiitin mikrorakennetta.

2. GRANIITTI (Mustio)

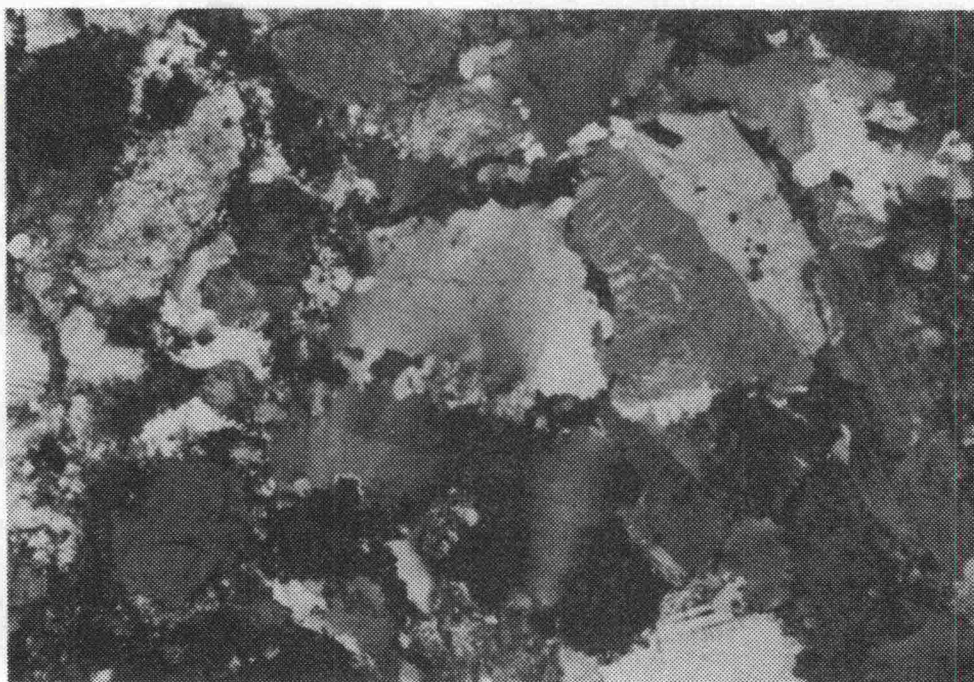
Kivi on makroskooppisesti punertavanharmaata, heikosti suuntautunutta, keskirakeista graniittia.

Kiven päämineraaleja ovat kvartsi (38 %), plagioklaasi (27 %), kalimaasälpä (26 %) ja biotiitti (8 %). Aksessoisina mineraaleina (vähäisessä määrin esiintyviä) esiintyy muskoviitti, serisiitti, zirkoni, epidootti ja opaakki (valoa huonosti läpäisevä, yleensä malmimineraali).

Plagioklaasi on koostumukseltaan oligoklaasia (10-15 % anortiittia). Plagioklaasi on heikosti serisiittiytynyt (< 10 %) ja paikoin se on rakeiden keskeltä muuttunut karbonaatiksi.

Kalimaasälpärakeissa esiintyy runsaasti pertiittisuotautumia. Biotiitti esiintyy suurempien maasälpä- ja kvartsirakeiden ympärillä repaleisina luitroina. Biotiitti ei muodosta kvartsi- ja maasälpämineraalien ympärille yhtenäistä verkostoa. Mineraalien väliset raerajat ovat hyvin mutkikkaita ja ainoastaan suurempien biotiittirakeiden reunat ovat paikoin suoria.

Kivessä on rikkoutumisrakenteen piirteitä. Suuria (2-7 mm) porfyyrisiä maasälpä- ja kvartsirakeita ympäröi hienompi rakenne maasälpä-kvartsi-biotiittivyöhyke. Porfyyrirakeet ovat usein särkyneet useiksi kappaleiksi, joiden välissä on samantyyppinen hienorakeinen rakotäyte kuin porfyyrirakeiden ympärillä (kuva). Paikoin suurten plagioklaasirakeiden reunoilla on myrmekiittimäisiä plagioklaasin ja kvartsin yhteenkasvetumia. Kiven porfyyrisestä rakenteesta johtuen mineraalien raekoko hieman vaihtelee.



Mustion graniitin mikrorakennetta. Porfyyrysten kvartsi- ja maasälpärakeiden (keskellä) väleissä on hienorakeinen kvartsi-maasälpävyöhyke.

3. GRANODIORIITTI (Ilvesvuori)

Kivi on harmaata melko hienorakeista, heikosti suuntautunutta granodioriittia. Kivessä on tiheään 1-3 mm suuruisia pyöreäköjä hajarakeita.

Kiven päämineraalit ovat plagioklaasi (41 %), kvartsi (33 %), kalimaasälpä (33 %) ja biotiitti (10 %). Aksessorisina mineraaleina on karbonaattia, titaniittia, epidoottia ja opaakkia.

Plagioklaasi, kalimaasälpä ja kvartsi muodostavat porfyyrisiä rakeita (maksimiraekoko = 3 mm). Plagioklaasi on koostumukseltaan oligoklaasia. Varsinkin suuremmat plagioklaasirakeet ovat vähäisessä määrin (alle 5 %) muuttuneet serisiitiksi ja paikoin karbonaatiksi. Useimmat porfyyriset kvartsirakeet ovat rikkonaisia. Myös kalimaasälpä esiintyy pääasiassa rikkonaisina porfyyrisinä rakeina. Biotiittirakeet ovat suuntautuneet liuskeisuuden mukaan. Ne eivät kuitenkaan muodosta yhtenäisiä kiillekerroksia, vaan lyhyitä epäjatkuvia "horisontteja".



Ilvesvuoren granodioriitin mikrorakennetta.

Rakenteeltaan kivi on heikohkosti myloniittiutunutta (rikkoutunutta). Useimmat suuret porfyirikiteet ovat rikkoutuneet ja niitä ympäröi hienorakeisempi mineraalimassa. Useimpien rakeiden reunat ovat lisäksi "syöpyneet" lahdelmaisiksi. Kapeat, epäjatkovat yhdensuuntaiset kiilleluliroit antavat kivelle suuntautuneen ulkoasun. Porfyyrisestä rakenteesta johtuen raekoko hieman vaihtelee.

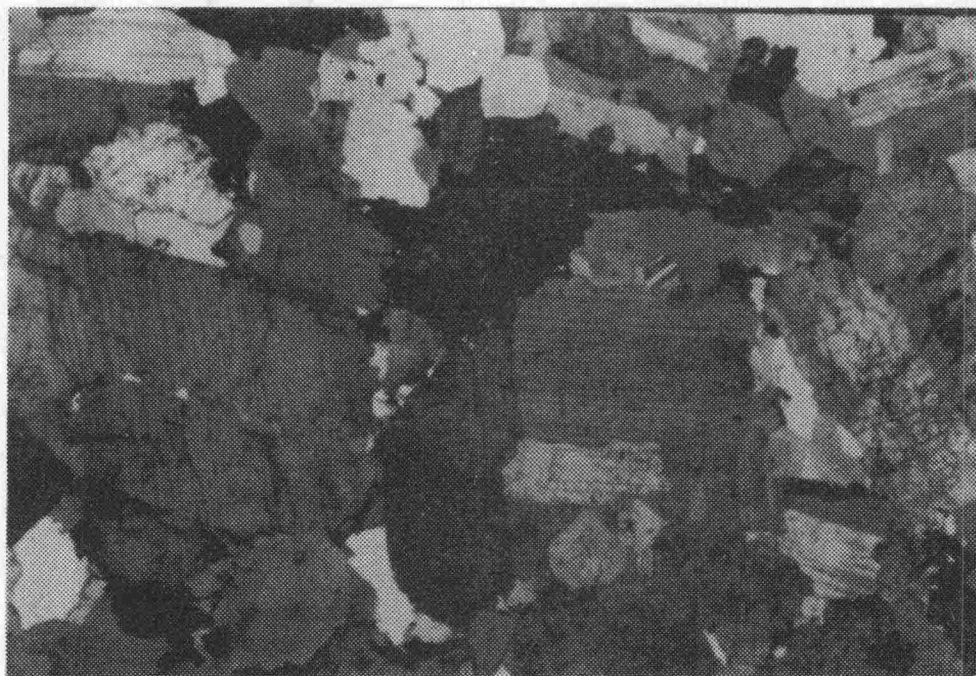
4. KVARTSIDIORIITTI (Nummenoja)

Kivi on makroskooppisesti melko karkearakeista, suuntautumaton, yleisväriltään vaaleanharmaata kvartsidioriittia. Siellä täällä kivessä on tummien mineraalien kasautumia. Muutoin kivi on tasalaatuista.

Kiven päämineraalit ovat plagioklaasi (39 %), kvartsi (28 %), kalimaasälpä (12 %), sarvivälke (11 %) ja biotiitti (9 %). Aksessorisina mineraaleina on apatiittia, titaniittia, zirkonnia, epidoottia ja pyrokseenia.

Plagioklaasi on koostumukseltaan andesiinia. Plagioklaasin lohkoraoissa on paikoitellen epidoottia. Satunnaisesti kali-maasälpä muodostaa kvartsin kanssa myrmeikiittirakennetta. Tummat mineraalit sarvivälke ja biotiitti muodostavat omia repaleisia ryppäitä. Ne eivät kuitenkaan muodosta yhtenäistä verkostoa vaaleiden mineraalien ympärille. Sarvivälke on muuttunut osittain biotiitiksi ja paikoin myös epidootiksi. Sarvivälkerakeiden keskellä on satunnaisesti pyrokseenirakeiden jäänteitä.

Kiven rakenne on osittain omamuotoinen. Suurten maasälpä- ja biotiittirakeiden raerajat ovat usein suoria, jolloin kivi on rakenteellisesti heikkoa. Eri mineraalikiteiden rajapinnoilla ei ole näkyvissä kontaktifilmejä tai saumoja. Mineraalien raekoossa ei ole suurta vaihtelua.



Nummenojan kvartsidioriitin mikrorakennetta.

5. GABRO (Usmi)

Kivi on makroskooppisesti homogeenista, keskirakeista, suuntaumatonta ja yleisväriltään tummaa gabroa. Paikoitellen kivessä on suurempia (n. 3-4 mm) kiillehajarakeita.

Kiven päämineraalit ovat plagioklaasi (55 %), pyrokseeni (27 %) ja amfiboli (12 %). Aksessorisia mineraaleja ovat opaakki, biotiitti, kvartsi, apatiitti ja flogopiitti.

Plagioklaasi on kivessä pitkulaisina, selvärajaisina liistakkeina. Plagioklaasi on koostumukseltaan labradoriittia. Plagioklaasirakeet ovat lähes muuttumattomia, ainoastaan rakeiden keskellä ja lohkoraoissa on hieman (alle 5 %) karbonaattia muuttumistuloksena.

Pyrokseeni esiintyy sekä orto- että klinomuodossa. Ortopyrokseeni on koostumukseltaan hypersteeniä ja klinopyrokseeni augiittia. Hypersteenikiteet ovat muuttuneet reunoiltaan ja lohkoraoistaan klinopyrokseeniksi ja amfiboliksi. Myös augiitti on muuttunut osittain amfiboliksi. Amfiboli on koostumukseltaan sarvivälkettä. Sarvivälke on kivessä sekundäärisenä ja se on paikoin muuttunut biotiitiksi. Aksessorisista mineraaleista opaakkia (magnetiiittia) esiintyy runsaammin. Opaakit ovat maasälpärakeiden väleissä repaleisina rakeina ja niiden yhteydessä on usein biotiittia.

Vaikka plagioklaasikiteet ovat omamuotoisempia kuin pyrokseenikiteet, ei kiven rakenne ole selvästi ofiittinen. Mineraalien raerajat ovat enimmäkseen suoria. Tummien mineraalien muuttumistuloksia lukuunottamatta ei rakeiden pinnalla ole varsinaisia kontaktifilmejä. Mineraalien raekoossa ei kiillehajarakeita lukuunottamatta ole suurta vaihtelua. Koostumukseltaan kivi on hyvin tasalaatuista.



1mm

Usmin gabron mikrorakennetta. Liistakemaisien plagioklaasirakeiden ympärillä pyrokseeni- ja amfiboliimineraaleja.

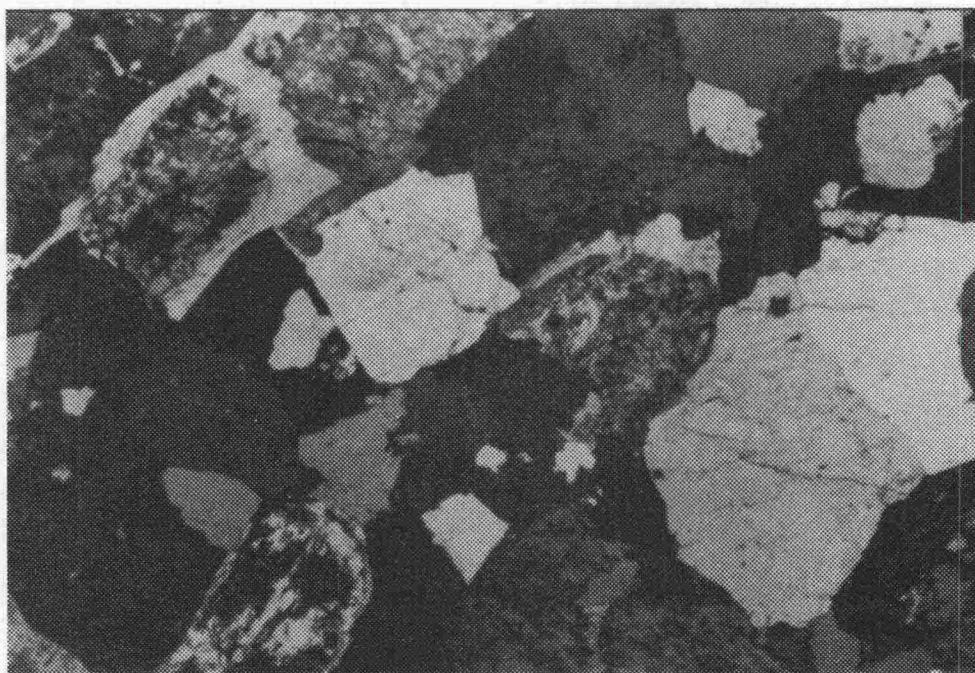
6. GRANIITTI (Vehmaa)

Kivi on makroskooppisesti karkearakeista, suuntautumaton punaista graniittia.

Kiven päämineraalit ovat kvartsi (40 %), kalimaasälpä (39 %), plagioklaasi (16 %) ja biotiitti (5 %). Aksessorisina mineraaleina esiintyvät muskoviitti, serisiitti, zirkoni ja opaakki.

Kvartsikiteet ovat täysin vierasmuotoisia. Kalimaasälpärakeissa on runsaasti ristikkokaksostusta sekä pertiittisuotautumia.

Plagioklaasissa esiintyy lamellikaksostusta ja vyöhykkeellisyys on siinä tavallista. Usein kiteissä on serisiittiytyneitä (alle 5 % serisiittiä) ja pigmenttiytyneitä vyöhykkeitä. Biotiitti esiintyy harvana "pirotteena". Biotiitti on raerajoiltaan suhteellisen selvärajainen. Biotiitin keskimääräinen raekoko on selvästi pienempi kuin muiden päämineraalien.



Vehmaan graniitin mikrorakennetta.

Rakenteeltaan kivi on hypidiomorfinen eli osittain omamuotoinen. Kiteiden raerajat ovat usein suoria eikä niillä ole havaittavissa kontaktifilmejä. Erikoisesti biotiitin ja maasälvän sekä maasälprien väliset raerajat ovat usein suoria. Kivessä ei ole havaittavissa mikrorakoja. Mineraalien raekoossa ei ole suurta vaihtelua. Koostumukseltaan ja rakenteeltaan kivi on hyvin tasalaatuista.

7. KIILLEGNEISSI (Isotalo)

Makroskooppisesti tarkasteltuna kivi on suuntautunutta, keskirakeista väriltään punertavanharmaata kiillegneissiä. Kiven pintaa läiskittävät punertavat granaattiporfyroblastit (raekoko 3-10 mm).

Kiven päämineraalit ovat plagioklaasi (49 %), kvartsi (35 %), biotiitti (11 %) ja granaatti (5 %). Aksessorisina mineraaleina esiintyvät zirkoni, opaakki, karbonaatti ja apatiitti.

Plagioklaasi on koostumukseltaan oligoklaasia. Plagioklaasirakeet ovat lähes muuttumattomia. Biotiittia esiintyy suuntautuneena "pirotteena". Granaatti esiintyy rikkonaisina porfyroplasteina, joissa on sulkeumina runsaasti muita mineraaleja.

Rakenteeltaan kivi on suonigneissimäinen. Mineraalit eivät ole omamuotoisia ja raerajoiltaan ne ovat erittäin lahdelmaisia. Ainoastaan biotiitin sekä granaattikasaumien raerajat ovat suurempia. Paikkapaikoin kiteiden pinnoilla esiintyy pigmenttiä. Mineraalien välisiä kontaktifilmejä ei esiinny.

Kiven suonigneissimäisen rakenteen vuoksi sen keskimääräistä mineraalikoostumusta on vaikea arvioida yhden ohuthieen perusteella. Silmämääräisesti arvioiden näytelohkareen granaattipitoisuus on huomattavasti suurempi kuin 5 %. Näytteenä ollut lohkar ei edusta tyypillistä kiillegneissiä, vaan on melko voimakkaasti graniittiutunut.



1mm

Isotalon kiillegneissin mikrorakennetta. Kuvan vasemmassa alakulmassa on näkyvissä osa rikkonaisesta granaattiporfyroblastista.

8. TONALIITTI (Koskenkylä)

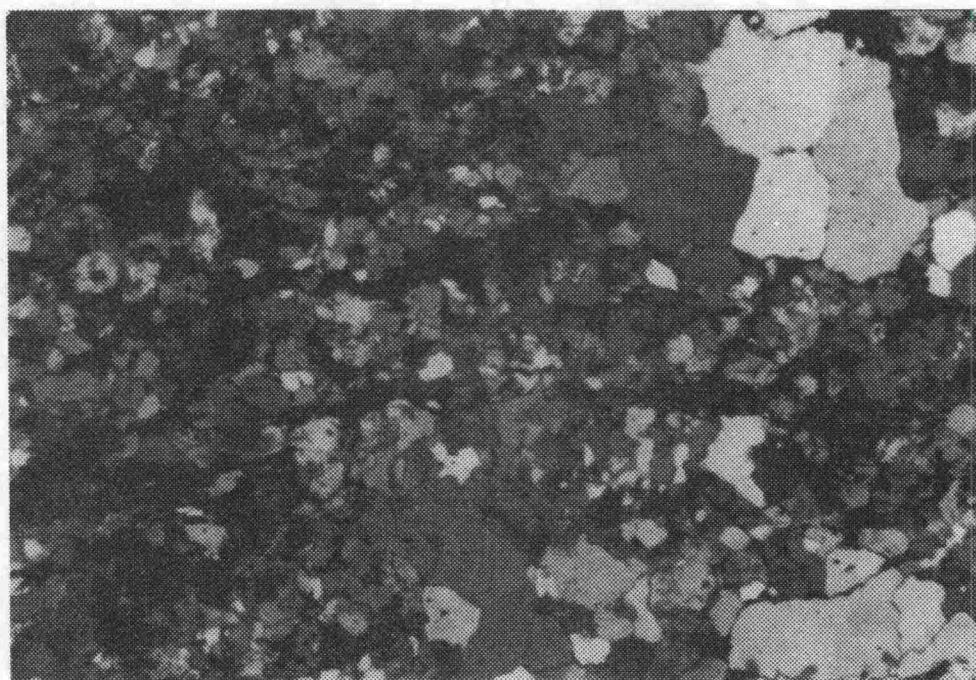
Mikroskooppisesti tarkasteltuna kivi on kohtalaisesti suuntautunutta, hienorakeista, väriltään punaista, metamorfoitunutta tonaliittia.

Kiven päämineraalit ovat plagioklaasi (53 %), kvartsi (32 %) amfiboli (9 %) ja epidootti (5 %). Aksessorisena mineraalina on opaakkia.

Plagioklaasi on täysin vierasmuotoisina kiteinä. Plagioklaasi on koostumukseltaan albiittinen. Plagioklaasikiteitä peittää kauttaaltaan pölymäinen pigmentti. Amfiboli on yleensä koostumukseltaan sarvivälkettä. Sarvivälke esiintyy erillisinä repaleisina raeryppäinä. Lisäksi satunnaisesti esiintyy sälöistä amfibolia, jonka koostumus on tremoliittia. Sarvivälkeryppäiden yhteydessä on usein epidoottia ja kloriittia.

Kivi on heikosti hiertynyt tai myloniittiutunut. Kvartsi ja plagioklaasi esiintyvät usein silmäkemäisinä linsseinä. Suurimmat kvartsirakeet ovat särkyneet. Paikoitellen voimakkaimmin pigmentoituneiden plagioklaasirakeiden väleissä on ruskeanpunainen kontaktivyöhyke. Paikoin myös kvartsirakeiden "raoissa" on tällainen vyöhyke. Paikoin kivessä on erittäin kapeita mikrorakoja, jotka ovat suuntautuneet vinosti kiven liuskeisuuteen nähden.

Mineraalien raekoko vaihtelee niin, että suurempien mineraalien tai mineraalikasautumien väleissä on runsaasti pienikokoisia mineraaleja. Mineraalit eivät ole omamuotoisia eikä niiden välillä ole yleensä suoraa raerajoja.



Koskenkylän tonaliitin mikrorakennetta. Suurempien kvartsi- ja maasälpämineraalien väleissä pienempiä mineraaleja.

9. TUFFIITTI (Rippu)

Makroskooppisesti kivi on kohtalaisesti suuntautunutta, raitaista, hienorakeista ja väriltään vihertävänharmaata tuffiittia. Joissakin raidoissa on pienehköjä vaaleita ja tummia hajarakeita. Kivi on melko heterogeenista.

Kivi koostuu hienorakeisesta perusmassasta (raekoko alle 0.05 mm) ja hajarakeista (raekoko vaihtelee n. 0.5-1.5 mm). Kiven päämineraalit ovat kvartsi (19 %), amfiboli (21 %), plagioklaasi (46 %) ja biotiitti (14 %). Perusmassan hienorakeisuudesta johtuen kvartsia ja plagioklaasia ei voi varmuudella erottaa toisistaan. Tästä johtuen niiden keskinäiset prosentuaaliset osuudet ovat epävarmoja.

Kvartsi esiintyy lähes yksinomaan pienirakeisessa perusmassassa. Koostumukseltaan plagioklaasirakeet ovat oligoklaasia. Hajarakeet ovat reunoiltaan yleensä voimakkaasti lahdelmalliseksi syöpyneitä ja muuttuneet (10-25 %) karbonaatiksi ja paikoin serisiitiksi. Perusmassan plagioklaasi on lähes muuttumatonta. Muodoltaan nämä plagioklaasirakeet ovat usein liistakemaisia. Amfiboli on koostumukseltaan sarvivälkettä.

Sitä esiintyy pieninä suuntautuneina raeryppäinä ja yksittäisinä kiteinä perusmassassa. Biotiitti esiintyy amfibolin tavoin ja on ainakin osittain sen muuttumistulosta.

Mikrorakenteeltaan kivi muistuttaa hierto- tai virtausrakenteista kiveä. Plagioklaasihajakeiden ympärille muodostavat perusmassa ja biotiittiryppäät pyörteisen, silmäkkeisen rakenteen. Kivessä on muutaman senttimetrin välein kapeita (n. 0.2 mm) liuskeisuutta ja venymää vastaan vinoja mikrorakojuonia. Pienessä mittakaavassa mineraalien raekoko vaihtelee huomattavasti.



0,5 mm

Ripun tuffiitin suurennettua mikrorakennetta. Kuvassa havaittavissa kaksi (oikealla ylhäällä ja keskellä alhaalla) syöpynttä plagioklaasihajaraetta.

10. AMFIBOLIITTI (Paapanluhdanmäki)

Makroskooppisesti kivi on heterogeenistä, raitaista ja yleisväriltään vihertävänmustaa amfiboliittia. Kivessä on myös vaaleanvihertäviä karsiraitoja. Raekoko vaihtelee raidoissa hienorakeisesta keskirakeiseen. Paikoin kivi on pienoispömmuttunutta.

Kiven päämineraalit ovat amfiboli (61 %) ja plagioklaasi (35 %). Aksessorisina ovat epidootti, karbonaatti, titaniitti, opaakki, kloriitti ja kvartsi.

Koostumukseltaan amfiboli on sarvivälkettä. Sarvivälkerakaiden raerajat ovat yleensä suoria. Paikoitellen hiertovyöhykeissä osa sarvivälkkeestä on muuttunut kloriitiksi. Plagioklaasi on koostumukseltaan andesiinia. Plagioklaasikiteet ovat yleensä epämääräisen muotoisia. Paikoin plagioklaasi on muuttunut voimakkaasti serisiitiksi ja paikoin epidootiksi.

Kiven rakenteelle on tyypillistä voimakas liuskeisuus ja venyneisyys sekä raitaisuus. Raidoissa vaihtelevat sekä raekoko että mineraalikoostumus. Kivessä on runsaasti mikrorakoja ja mikrorakojuonia, jotka ovat vinossasuunnassa liuskeisuuteen nähden.



Paapanluhdanmäen amfiboliitin mikrorakennetta kuvattuna kohtisuoraan venymää vastaan.

LIITE 3. Ohuthieistä määritettyjen pää-
mineraalien prosenttuaaliset
osuudet

	TVH-1	TVH-2	TVH-3	TVH-4	TVH-5
kvartsi	97	38	33	28	-
kalimaasälpä	-	26	13	12	-
plagioklaasi	-	27	41	39	55
amfiboli	-	-	-	11	12
pyrokseeni	-	-	-	-	27
kiille	-	8	10	9	-
epidootti	-	-	-	-	-
granaatti	-	-	-	-	-
YHTEENSÄ	97	99	97	99	94

	TVH-6	TVH-7	TVH-8	TVH-9	TVH-10
kvartsi	40	35	32	19x	-
kalimaasälpä	39	-	-	-	-
plagioklaasi	16	49	53	46x	35
amfiboli	-	-	9	21	61
pyrokseeni	-	-	-	-	-
kiille	5	11	-	14	-
epidootti	-	-	5	-	-
granaatti	-	5	-	-	-
YHTEENSÄ	100	100	99	100	96

x) Kiven hienorakeisuudesta johtuen kvartsin ja plagioklaasin erottaminen vaikeaa, joten niiden prosenttuaaliset osuudet ovat epävarmoja.

LIITE 4. Laboratoriokokeiden tulokset.

Näyte	E (GPa)	ν	σ_{pm} (MPa)	σ_{vm} (MPa)	$I_s(32)$	$I_s(50)$	VHk	SJ
1.a kvartsiitti	72.65	0.22	387.30	10.01	17.00	11.50	1030	1.30
1.b kvartsiitti	66.80	0.19	335.50	10.10	16.00	11.30	1030	2.00
2. graniitti	57.50	0.35	162.90	6.30	14.20	10.00	817	2.90
3. granodioriitti	58.70	0.31	159.60	12.50	14.00	9.85	790	2.90
4. kvartsidioriitti	50.04	0.23	164.40	7.70	10.00	7.20	772	4.20
5. gabro	70.80	0.34	242.00	12.90	18.00	12.00	705	3.90
6. graniitti	49.71	0.20	146.02	8.80	10.90	7.30	842	3.00
7. kiillegneissi	59.00	0.41	120.00	7.80	9.60	6.80	836	5.40
8. tonaliitti	64.83	0.26	324.40	11.90	18.90	13.50	869	2.80
9. tuffiitti	69.80	0.25	203.90	13.40	15.20	10.67	781	5.40
10.a amfiboliitti	144.75	0.19	226.50	9.70	11.50	8.11	674	23.75
10.b amfiboliitti	84.70	0.29	163.80	9.30	10.10	7.23	674	109.21
11. soramurske	-	-	-	-	-	-	-	-

	Proto- 20'	S 20'	PNI	Tröger (cm ³)	Raekoko max(mm)	Raekoko keski(mm)	Hiout.luku (cm ³)
1.a kvartsiitti	47.83	49.92	40.03	0.32	1.80	0.60	1.65
1.b kvartsiitti	41.28	46.64	40.00	0.32	1.80	0.60	1.65
2. graniitti	55.90	53.95	48.00	0.78	7.00	2.00	1.79
3. granodioriitti	33.42	42.71	36.40	3.49	3.00	0.33	2.22
4. kvartsidioriitti	49.50	50.75	48.60	11.03	7.00	2.00	2.75
5. gabro	27.69	39.85	34.00	11.17	3.20	1.50	2.64
6. graniitti	61.63	56.82	51.40	5.95	8.00	3.50	2.16
7. kiillegneissi	54.96	53.48	50.00	16.83	3.60	1.30	2.38
8. tonaliitti	32.14	42.07	36.00	0.24	1.00	0.17	1.46
9. tuffiitti	34.74	43.37	41.00	4.16	3.60	0.24	2.49
10.a amfiboliitti	28.84	40.42	45.00	21.15	1.00	0.30	3.07
10.b amfiboliitti	31.96	41.98	56.20	21.15	1.00	0.30	3.07
11. soramurske	-	-	-	-	10.00	0.70	1.85

	p-haur.	Los A	p-haur. $\sqrt{x/hiout}$	Muoto c/a	Muoto b/a	VTT (cm ³)	hiout $\sqrt{x/p-haur}$	hiout x p-haur
1.a kvartsiitti	16.10	18.90	20.68	3.02	1.90	2.52	6.62	26.57
1.b kvartsiitti	16.10	18.90	20.68	3.02	1.90	2.52	6.62	26.57
2. graniitti	19.70	23.00	26.36	2.22	1.57	26.36	7.94	35.26
3. granodioriitti	15.00	18.40	22.35	2.04	1.50	5.37	8.60	33.30
4. kvartsidioriitti	20.00	25.10	33.17	2.24	1.54	10.07	12.30	55.00
5. gabro	14.10	17.20	22.91	2.08	1.61	26.89	9.91	37.22
6. graniitti	29.50	34.40	43.36	2.33	1.54	3.71	11.73	63.72
7. kiillegneissi	21.00	27.20	32.40	2.38	1.56	33.21	10.91	49.98
8. tonaliitti	12.60	13.70	15.22	2.48	1.66	2.76	5.18	18.40
9. tuffiitti	17.70	21.20	27.93	2.72	1.74	9.61	10.48	44.07
10.a amfiboliitti	14.50	16.10	25.41	2.69	1.69	11.82	11.69	44.52
10.b amfiboliitti	14.50	16.10	25.41	2.69	1.69	11.82	11.69	44.52
11. soramurske	16.90	22.60	22.99	2.31	1.59	-	7.61	31.27

a = liuskeisuuden tai kerroksellisuuden/kerrallisuuden suunnassa tehty mittaus

b = liuskeisuutta tai kerroksellisuutta/kerrallisuutta vastaan kohtisuoraan tehty mittaus

VTT = VTT:n tie- ja liikennelaboratorion poranäytteen kulutuslaitteen tulokset

Kimmomoduliarvot.

Näyte	Numero	Kimmomoduli (E)	Keskiarvo	Hajonta
<u>Kvartsiitti</u>	1 a/ 1	70.70		
	/ 2	72.70		
Rytyli	/ 3	71.20		
	/ 4	76.00	72.65	2.40
(kohtisuoraan	1 b/ 1	65.90		
liuskeisuutta	/ 2	69.90		
tai kerroksel-	/ 3	68.50		
lisuutta)	/ 4	63.20	66.80	2.90
<u>Graniitti</u>	2 / 1	50.11		
	/ 2	55.62		
Mustio	/ 3	60.25		
	/ 4	64.02	57.50	6.01
<u>Granodioriitti</u>	3 / 1	52.26		
	/ 2	63.76		
Ilvesvuori	/ 3	65.13		
	/ 4	53.62	58.70	6.70
<u>Kvartsidioriitti</u>	4 / 1	55.50		
	/ 2	46.30		
Nummenoja	/ 3	45.90		
	/ 4	52.44	50.04	4.72
<u>Gabro</u>	5 / 1	68.28		
	/ 2	-		
Usmi	/ 3	70.60		
	/ 4	73.53	70.80	2.63
<u>Graniitti</u>	6 / 3	51.20		
	/ 5	50.74		
Vehmaa	/ 6	47.20	49.71	2.20
<u>Kiillegneissi</u>	7 / 1	61.18		
	/ 2	55.42		
Isotalo	/ 3	60.41		
	/ 4	-	59.00	3.13
<u>Tonaliitti</u>	8 / 1	70.33		
	/ 2	61.33		
Koskenkylä	/ 3	62.84		
	/ 4	-	64.84	4.80
<u>Tuffiitti</u>	9 / 1	66.10		
	/ 2	66.30		
Rippu	/ 3	82.80		
	/ 4	64.00	69.80	8.72
<u>Amfiboliitti</u>	10 a/ 1	140.90		
	/ 2	140.90		
Paapanluhdan-	/ 3	144.60		
mäki	/ 4	152.60	144.75	5.50
(kohtisuoraan	10 b/ 1	86.40		
liuskeisuutta	/ 2	-		
tai kerroksel-	/ 3	79.70		
lisuutta)	/ 4	87.40	84.70	3.44

Näyte	Numero	Poissonin luku	Keskiarvo	Hajonta
<u>Kvartsiitti</u>	1 a/ 1	0.23		
	/ 2	0.24		
Rytyli	/ 3	0.21		
	/ 4	0.19	0.22	0.02
(kohtisuoraan	1 b/ 1	0.20		
liuskeisuutta	/ 2	0.21		
tai kerroksel-	/ 3	0.16		
lisuutta)	/ 4	0.20	0.19	0.20
<u>Graniitti</u>	2 / 1	0.32		
	/ 2	0.32		
Mustio	/ 3	0.44		
	/ 4	0.32	0.35	0.06
<u>Granodioriitti</u>	3 / 1	0.29		
	/ 2	0.35		
Ilvesvuori	/ 3	0.34		
	/ 4	0.27	0.31	0.04
<u>Kvartsidioriitti</u>	4 / 1	0.21		
	/ 2	0.21		
Nummenoja	/ 3	0.24		
	/ 4	0.24	0.23	0.02
<u>Gabro</u>	5 / 1	0.35		
	/ 2	-		
Usmi	/ 3	0.36		
	/ 4	0.30	0.34	0.03
<u>Graniitti</u>	6 / 3	0.28		
	/ 5	0.14		
Vehmaa	/ 6	0.18	0.20	0.07
	/			
<u>Kiillegneissi</u>	7 / 1	0.45		
	/ 2	0.40		
Isotalo	/ 3	0.37		
	/ 4	-	0.41	0.04
<u>Tonaliitti</u>	8 / 1	0.29		
	/ 2	0.23		
Koskenkylä	/ 3	0.27	0.26	0.03
	/ 4			
<u>Tuffiitti</u>	9 / 1	0.15		
	/ 2	0.35		
Rippu	/ 3	0.19		
	/ 4	0.30	0.25	0.09
<u>Amfiboliitti</u>	10 a/ 1	0.18		
	/ 2	0.15		
Paapanluhdan-	/ 3	0.21		
mäki	/ 4	0.23	0.19	0.04
(kohtisuoraan	10 b/ 1	0.32		
liuskeisuutta	/ 2	-		
tai kerroksel-	/ 3	0.26		
lisuutta)	/ 4	0.28	0.29	0.03

Näyte	Numero	Puristusmurtolujuus (MPa)	Keskiarvo	Hajonta
<u>Kvartsiitti</u>	1 a/ 1	402.50		
	/ 2	376.60		
Rytyli	/ 3	382.80		
	/ 4	-	387.30	13.50
(kohtisuoraan liuskeisuutta tai kerroksel- lisuutta)	1 b/ 1	343.30		
	/ 2	327.20		
	/ 3	-		
	/ 4	335.90	335.50	8.10
<u>Graniitti</u>	2 / 1	180.90		
	/ 2	141.30		
Mustio	/ 3	166.41	162.90	20.00
	/ 4			
<u>Granodioriitti</u>	3 / 1	149.60		
	/ 2	200.00		
Ilvesvuori	/ 3	141.20		
	/ 4	147.70	159.60	27.20
<u>Kvartsidioriitti</u>	4 / 1	156.20		
	/ 2	179.40		
Nummenoja	/ 3	136.60		
	/ 4	185.20	164.40	22.30
<u>Gabro</u>	5 / 1	-		
	/ 2	240.30		
Usmi	/ 3	245.70		
	/ 4	240.00	242.00	3.20
<u>Graniitti</u>	6 / 1	114.50		
	/ 2	166.80		
Vehmaa	/ 3	121.98		
	/ 4	180.81	146.02	32.70
<u>Kiillegneissi</u>	7 / 1	122.30		
	/ 2	133.40		
Isotalo	/ 3	104.40	120.00	14.60
	/ 4			
<u>Tonaliitti</u>	8 / 1	363.10		
	/ 2	347.00		
Koskenkylä	/ 3	263.00	324.40	53.80
	/ 4			
<u>Tuffiitti</u>	9 / 1	203.60		
	/ 2	199.60		
Rippu	/ 3	208.50		
	/ 4	183.30	203.90	4.50
<u>Amfiboliitti</u>	10 a/ 1	247.30		
	/ 2	205.00		
Paapanluhdan- mäki	/ 3	208.70		
	/ 4	244.80	226.50	22.70
(kohtisuoraan liuskeisuutta tai kerroksel- lisuutta)	10 b/ 1	180.30		
	/ 2	142.30		
	/ 3	174.20		
	/ 4	158.30	163.80	17.10

Näyte	Numero	Vetomurtolujuus (MPa)	Keskiarvo	Hajonta
<u>Kvartsiitti</u>	1 a/ 1	11.27		
	/ 2	8.32		
Rytyli	/ 3	10.43	10.01	1.52
(kohtisuoraan	1 b/ 1	9.00		
liuskeisuutta	/ 2	9.80		
tai kerroksel-	/ 3	8.40		
lisuutta)	/ 4	13.20	10.10	2.10
<u>Graniitti</u>	2 / 1	5.50		
	/ 2	5.90		
Mustio	/ 3	7.40	6.27	1.00
<u>Granodioriitti</u>	3 / 1	9.26		
	/ 2	12.53		
Ilvesvuori	/ 3	15.78	12.52	3.26
<u>Kvartsidioriitti</u>	4 / 1	6.80		
	/ 2	7.30		
Nummenoja	/ 3	8.96	7.69	1.13
<u>Gabro</u>	5 / 1	11.40		
	/ 2	15.92		
Usmi	/ 3	11.40	12.91	2.61
<u>Graniitti</u>	6 / 1	6.90		
	/ 2	10.09		
Vehmaa	/ 3	9.30	8.76	1.66
<u>Kiillegneissi</u>	7 / 1	8.27		
	/ 2	7.55		
Isotalo	/ 3	7.55	7.79	0.42
<u>Tonaliitti</u>	8 / 1	14.44		
	/ 2	12.27		
Koskenkylä	/ 3	9.06	11.92	2.71
<u>Tuffiitti</u>	9 / 1	8.00		
	/ 2	13.80		
Rippu	/ 3	15.40		
	/ 4	16.20	13.40	3.70
<u>Amfiboliitti</u>	10 a/ 1	9.51		
	/ 2	8.18		
Paapanluhdan-	/ 3	11.34	9.68	1.59
mäki				
(kohtisuoraan	10 b/ 1	7.67		
liuskeisuutta	/ 2	9.33		
tai kerroksel-	/ 3	10.80	9.27	1.57
lisuutta)				

Näyte	Numero	Pistekuormitusindeksi Is (32)	Keskiarvo	Hajonta
<u>Kvartsiitti</u>	1 a/ 1	18.90		
	/ 2	16.80		
Rytyli	/ 3	16.40		
	/ 4	15.80	17.00	1.30
(kohtisuoraan liuskeisuutta tai kerroksel- lisuutta)	1 b/ 1	14.80	/ 5 14.50	
	/ 2	17.10		
	/ 3	15.20		
	/ 4	18.30	16.00	1.60
<u>Graniitti</u>	2 / 1	16.90		
	/ 2	10.90		
Mustio	/ 3	12.20		
	/ 4	16.90	14.20	3.10
<u>Granodioriitti</u>	3 / 1	14.90		
	/ 2	16.20		
Ilvesvuori	/ 3	11.00	14.00	2.70
<u>Kvartsidioriitti</u>	4 / 1	10.00		
	/ 2	8.60		
Nummenoja	/ 3	11.30	10.00	1.35
<u>Gabro</u>	5 / 1	20.10		
	/ 2	17.50		
Usmi	/ 3	16.30	18.00	2.00
<u>Graniitti</u>	6 / 1	10.70		
	/ 2	11.30		
Vehmaa	/ 3	10.90		
	/ 4	10.60	10.90	0.31
<u>Kiillegneissi</u>	7 / 1	8.70		
	/ 2	9.90		
Isotalo	/ 3	10.30		
	/ 4	9.40	9.60	0.70
<u>Tonaliitti</u>	8 / 1	17.30		
	/ 2	17.20		
Koskenkylä	/ 3	22.30	18.90	2.90
<u>Tuffiitti</u>	9 / 1	15.50		
	/ 2	13.00		
Rippu	/ 3	16.20		
	/ 4	15.90	15.20	1.46
<u>Amfiboliitti</u>	10 a/ 1	14.00		
	/ 2	11.60		
Paapanluhdan- mäki	/ 3	9.00	11.50	2.50
(kohtisuoraan liuskeisuutta tai kerroksel- lisuutta)	10 b/ 1	10.60		
	/ 2	12.70		
	/ 3	6.90		
	/ 4	7.20		
	/ 5	12.90	10.10	2.90

Näyte	Numero	Sieversin J'-arvo	Keskiarvo	Hajonta
<u>Kvartsiitti</u>	1 a/ 1	1.00 /5 1.50		
	/ 2	2.00		
Rytyli	/ 3	1.00		
	/ 4	1.00	1.30	0.45
(kohtisuoraan	1 b/ 1	2.50 /5 1.50		
liuskeisuutta	/ 2	2.50		
tai kerroksel-	/ 3	2.00		
lisuutta)	/ 4	1.50	2.00	0.50
<u>Graniitti</u>	2 / 1	3.50 / 5 4.50		
	/ 2	2.50		
Mustio	/ 3	2.00		
	/ 4	2.00	2.90	1.08
<u>Granodioriitti</u>	3 / 1	2.50 /5 2.50		
	/ 2	4.00		
Ilvesvuori	/ 3	2.50		
	/ 4	3.00	2.90	0.65
<u>Kvartsidioriitti</u>	4 / 1	3.00 /5 3.50		
	/ 2	4.00		
Nummenoja	/ 3	6.50		
	/ 4	4.00	4.20	1.35
<u>Gabro</u>	5 / 1	5.50 /5 6.00		
	/ 2	3.00		
Usmi	/ 3	2.50		
	/ 4	2.50	3.90	1.71
<u>Graniitti</u>	6 / 1	2.50		
	/ 2	3.00		
Vehmaa	/ 3	3.50		
	/ 4	3.00	3.00	0.41
<u>Kiillegneissi</u>	7 / 1	5.50		
	/ 2	4.00		
Isotalo	/ 3	3.00		
	/ 4	9.00	5.40	2.63
<u>Tonaliitti</u>	8 / 1	2.50 /5 3.00		
	/ 2	3.00		
Koskenkylä	/ 3	3.00		
	/ 4	2.50	2.80	0.27
<u>Tuffiitti</u>	9 / 1	5.00 /5 5.00		
	/ 2	5.50		
Rippu	/ 3	7.00		
	/ 4	4.50	5.40	0.96
<u>Amfiboliitti</u>	10 a/ 1	23.00		
	/ 2	27.50		
Paapanluhdan-	/ 3	19.00		
mäki	/ 4	25.50	23.75	3.66
(kohtisuoraan	10 b/ 1	102.00 /5 149.50		
liuskeisuutta	/ 2	112.00 /6 128.50		
tai kerroksel-	/ 3	145.50 /7 84.00		
lisuutta)	/ 4	43.00	109.20	37.40

Näyte	Numero	Proto-20'	Keskiarvo	Hajonta
<u>Kvartsiitti</u>	1 a/ 1	47.10		
	/ 2	46.40		
Rytyli	/ 3	50.00	47.83	1.90
(kohtisuoraan	1 b/ 1	37.64		
liuskeisuutta	/ 2	40.62		
tai kerroksel-	/ 3	45.59	41.28	4.02
lisuutta)	/ 4			
<u>Graniitti</u>	2 / 1	59.91		
	/ 2	49.28		
Mustio	/ 3	58.51	55.90	5.78
<u>Granodioriitti</u>	3 / 1	33.54		
	/ 2	33.84		
Ilvesvuori	/ 3	32.88	33.42	0.49
<u>Kvartsidioriitti</u>	4 / 1	47.87		
	/ 2	48.74		
Nummenoja	/ 3	51.88	49.50	2.11
<u>Gabro</u>	5 / 1	28.36		
	/ 2	28.56		
Usmi	/ 3	26.16	27.69	1.33
<u>Graniitti</u>	6 / 1	65.34		
	/ 2	63.60		
Vehmaa	/ 3	55.96	61.63	4.99
<u>Kiillegneissi</u>	7 / 1	57.28		
	/ 2	54.55		
Isotalo	/ 3	53.05	54.96	2.14
<u>Tonaliitti</u>	8 / 1	33.16		
	/ 2	29.85		
Koskenkylä	/ 3	33.40	32.14	1.98
<u>Tuffiitti</u>	9 / 1	33.44		
	/ 2	33.87		
Rippu	/ 3	36.87	34.73	1.87
<u>Amfiboliitti</u>	10 a/ 1	32.75		
	/ 2	28.32		
Paapanluhdan-	/ 3	25.45	28.84	3.68
mäki				
(kohtisuoraan	10 b/ 1	31.13		
liuskeisuutta	/ 2	31.52		
tai kerroksel-	/ 3	33.23	31.96	1.12
lisuutta)				

Näyte	Numero	Haurausarvo S20'	Keskiarvo	Hajonta
<u>Kvartsiitti</u>	1 a/ 1	49.55		
	/ 2	49.20		
Rytyli	/ 3	51.00	49.92	0.95
(kohtisuoraan	1 b/ 1	44.82		
liuskeisuutta	/ 2	46.31		
tai kerroksel-	/ 3	48.80	46.64	2.01
lisuutta)				
<u>Graniitti</u>	2 / 1	55.96		
	/ 2	50.64		
Mustio	/ 3	55.26	53.95	2.89
<u>Granodioriitti</u>	3 / 1	42.77		
	/ 2	42.92		
Ilvesvuori	/ 3	42.44	42.71	0.25
<u>Kvartsidioriitti</u>	4 / 1	49.94		
	/ 2	50.37		
Nummenoja	/ 3	51.94	50.75	1.05
<u>Gabro</u>	5 / 1	40.18		
	/ 2	40.28		
Usmi	/ 3	39.08	39.85	0.67
<u>Graniitti</u>	6 / 1	58.67		
	/ 2	57.80		
Vehmaa	/ 3	53.98	56.82	2.50
<u>Kiillegneissi</u>	7 / 1	54.64		
	/ 2	53.28		
Isotalo	/ 3	52.53	53.48	1.07
<u>Tonaliitti</u>	8 / 1	42.58		
	/ 2	40.93		
Koskenkylä	/ 3	42.70	42.07	0.99
<u>Tuffiitti</u>	9 / 1	42.72		
	/ 2	42.94		
Rippu	/ 3	44.44	43.37	0.94
<u>Amfiboliitti</u>	10 a/ 1	42.38		
	/ 2	40.16		
Paapanluhdan-	/ 3	38.73	40.42	1.84
mäki				
(kohtisuoraan	10 b/ 1	41.57		
liuskeisuutta	/ 2	41.76		
tai kerroksel-	/ 3	42.62	41.98	0.56
lisuutta)				

Koko aineisto.

MEANS AND STD.DEVS

* Parannettu haurausarvo x_i/Hioutuvuusluku
 Muotoarvo (c/a)
 Muotoarvo (b/a)
 Pistekuormitusindeksi (I₅₀)
☐ Hioutuvuusluku x_i/Parannettu haurausarvo
☐ Hioutuvuusluku x_i Parannettu haurausarvo
☒ Proto-20ärvo x_i Hioutuvuusluku
 VT:n porannavtten kulutuslaitteen arvo

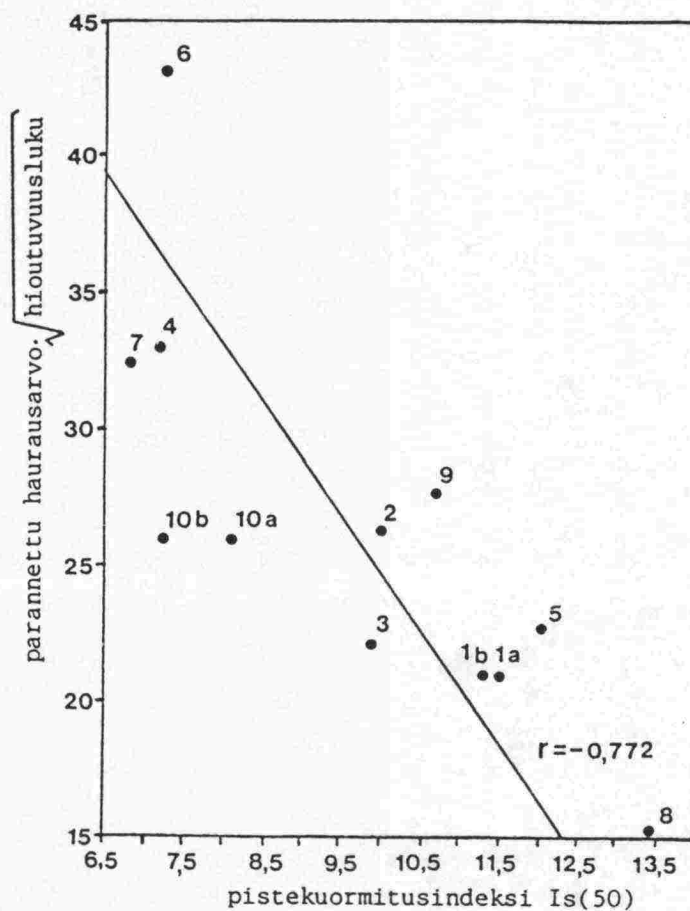
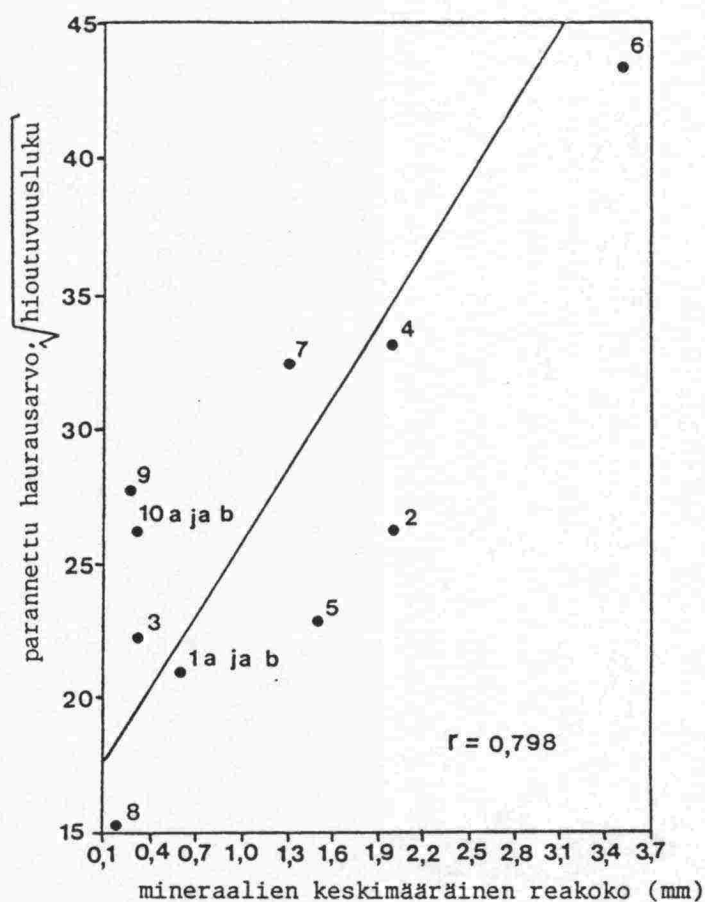
✱

	E	POISSO	PM-LUJ	VM-LUJ	IS-32	VHK	SJ'	PROTO-	S-20'	PNI	TRÖGER	MAX-RA	KESK-R	HIOUT	P-HAUR	LOS-A	P-HAUR
E	1.000	-0.315	0.180	0.113	-0.080	-0.390	0.347	-0.557	-0.557	0.009	0.556	-0.585	-0.480	0.481	-0.451	-0.506	-0.258
POISSON	-0.315	1.000	-0.476	-0.120	-0.079	-0.274	0.038	0.083	0.083	0.050	0.173	0.097	0.040	0.059	-0.057	0.042	-0.025
PM-LUJ	0.180	-0.476	1.000	0.354	0.764	0.640	-0.225	-0.294	-0.294	-0.600	-0.487	-0.558	-0.441	-0.560	-0.503	-0.545	-0.693
VM-LUJ	0.113	-0.120	0.354	1.000	0.618	-0.075	-0.109	-0.738	-0.738	-0.750	-0.206	-0.495	-0.529	-0.011	-0.510	-0.505	-0.467
IS-32	-0.080	-0.079	0.764	0.618	1.000	0.413	-0.408	-0.400	-0.399	-0.862	-0.677	-0.366	-0.353	-0.624	-0.522	-0.545	-0.731
VHK	-0.390	-0.274	0.640	-0.075	0.413	1.000	-0.482	0.418	0.418	-0.273	-0.725	-0.042	-0.001	-0.845	0.118	0.118	-0.216
SJ'	0.347	0.038	-0.225	-0.109	-0.408	-0.482	1.000	-0.324	-0.324	0.571	0.629	-0.363	-0.279	0.558	-0.243	-0.296	-0.030
PROTO-20	-0.557	0.083	-0.294	-0.738	-0.400	0.418	-0.324	1.000	0.999	0.510	-0.238	0.752	0.758	-0.332	0.855	0.863	0.668
S-20'	-0.557	0.083	-0.294	-0.738	-0.399	0.418	-0.324	0.999	1.000	0.510	-0.238	0.752	0.759	-0.332	0.855	0.863	0.668
PNI	0.009	0.050	-0.600	-0.750	-0.862	-0.273	0.571	0.510	0.510	1.000	0.538	0.366	0.404	0.424	0.547	0.515	0.663
TRÖGER	0.556	0.173	-0.487	-0.206	-0.677	-0.725	0.629	-0.238	-0.238	0.538	1.000	-0.189	-0.055	0.887	-0.053	-0.030	0.290
MAX-RAE	-0.585	0.097	-0.558	-0.495	-0.366	-0.042	-0.363	0.752	0.752	0.366	-0.189	1.000	0.893	-0.027	0.828	0.838	0.768
KESK-RAE	-0.480	0.040	-0.441	-0.529	-0.353	-0.001	-0.279	0.758	0.759	0.404	-0.055	0.893	1.000	-0.023	0.869	0.854	0.798
HIOUT	0.481	0.059	-0.560	-0.011	-0.624	-0.845	0.558	-0.332	-0.332	0.424	0.887	-0.027	-0.023	1.000	-0.035	-0.009	0.354
P-HAUR	-0.451	-0.057	-0.503	-0.510	-0.522	0.118	-0.243	0.855	0.855	0.547	-0.053	0.828	0.869	-0.035	1.000	0.984	0.919
LOS-A	-0.506	0.042	-0.545	-0.505	-0.545	0.118	-0.296	0.863	0.863	0.515	-0.030	0.838	0.854	-0.009	0.984	1.000	0.921
P-HAUR*H	-0.258	-0.025	-0.693	-0.467	-0.731	-0.216	-0.030	0.668	0.668	0.663	0.290	0.768	0.798	0.354	0.919	0.921	1.000
MUOTOC/A	0.376	-0.565	0.646	0.037	0.154	0.514	0.206	-0.090	-0.090	0.048	-0.081	-0.533	-0.457	-0.192	-0.212	-0.267	-0.287
MUOTOB/A	0.304	-0.501	0.819	0.209	0.444	0.583	0.070	-0.215	-0.215	-0.236	-0.251	-0.577	-0.496	-0.311	-0.377	-0.418	-0.489
IS(50)	-0.076	-0.082	0.763	0.609	0.993	0.414	-0.391	-0.421	-0.421	-0.856	-0.685	-0.395	-0.409	-0.640	-0.562	-0.584	-0.772
HIOUT*HA	0.201	0.032	-0.742	-0.244	-0.813	-0.701	0.371	0.099	0.099	0.631	0.772	0.363	0.367	0.885	0.426	0.450	0.745
HIOUT*H	-0.065	-0.009	-0.758	-0.391	-0.820	-0.457	0.153	0.445	0.445	0.692	0.537	0.628	0.650	0.626	0.750	0.763	0.949
P20*HIOUT	0.088	0.113	-0.763	-0.453	-0.894	-0.588	0.348	0.284	0.284	0.741	0.742	0.447	0.436	0.802	0.496	0.537	0.780
VTT	0.082	0.642	-0.392	0.013	-0.276	-0.427	0.086	-0.101	-0.101	0.093	0.636	-0.072	0.043	0.510	-0.021	0.093	0.191
				□	○	■											
	MUOTOC	MUOTOB	IS(50)	HIOUT*	HIOUT*	P20*HI	VTT										
E	0.376	0.304	-0.076	0.201	-0.065	0.088	0.082										
POISSON	-0.565	-0.501	-0.082	0.032	-0.009	0.113	0.642										
PM-LUJ	0.646	0.819	0.763	-0.742	-0.758	-0.763	-0.392										
VM-LUJ	0.037	0.209	0.609	-0.244	-0.391	-0.453	0.013										
IS-32	0.154	0.444	0.993	-0.813	-0.820	-0.894	-0.276										
VHK	0.514	0.583	0.414	-0.701	-0.457	-0.588	-0.427										
SJ'	0.206	0.070	-0.391	0.371	0.153	0.348	0.086										
PROTO-20	-0.090	-0.215	-0.421	0.099	0.445	0.284	-0.101										
S-20'	-0.090	-0.215	-0.421	0.099	0.445	0.284	-0.101										
PNI	0.048	-0.236	-0.856	0.631	0.692	0.741	0.093										
TRÖGER	-0.081	-0.251	-0.685	0.772	0.537	0.742	0.636										
MAX-RAE	-0.533	-0.577	-0.395	0.363	0.628	0.447	-0.072										
KESK-RAE	-0.457	-0.440	-0.409	0.367	0.650	0.436	0.043										
HIOUT	-0.192	-0.311	-0.640	0.885	0.626	0.802	0.510										
P-HAUR	-0.212	-0.377	-0.562	0.426	0.750	0.496	-0.021										
LOS-A	-0.267	-0.418	-0.584	0.450	0.763	0.537	0.093										
P-HAUR*H	-0.287	-0.489	-0.772	0.745	0.949	0.780	0.191										
MUOTOC/A	1.000	0.931	0.170	-0.275	-0.302	-0.267	-0.313										
MUOTOB/A	0.931	1.000	0.446	-0.463	-0.514	-0.474	-0.304										
IS(50)	0.170	0.446	1.000	-0.841	-0.856	-0.917	-0.309										
HIOUT*HA	-0.275	-0.463	-0.841	1.000	0.915	0.964	0.464										
HIOUT*H	-0.302	-0.514	-0.856	0.915	1.000	0.920	0.331										
P20*HIOUT	-0.267	-0.474	-0.917	0.964	0.920	1.000	0.464										
VTT	-0.313	-0.304	-0.309	0.464	0.331	0.464	1.000										

	E	POISSO	PM-LUJ	VM-LUJ	IS-32	VHK	SJ'	PROTO-	S-20'	PNI	TRÖGER	MAX-RA	KESK-R	HIQUT	P-HAUR	LOS-A	P-HAUR
E	1.000	-0.113	0.860	0.443	0.791	0.822	-0.615	-0.483	-0.483	-0.691	-0.535	-0.868	-0.777	-0.759	-0.704	-0.728	-0.806
POISSON	-0.113	1.000	-0.558	-0.296	-0.309	-0.487	0.639	0.123	0.122	0.216	0.477	0.038	-0.100	0.226	-0.054	0.043	0.013
PM-LUJ	0.860	-0.558	1.000	0.464	0.846	0.854	-0.773	-0.479	-0.479	-0.669	-0.679	-0.723	-0.597	-0.765	-0.603	-0.676	-0.716
VM-LUJ	0.443	-0.296	0.464	1.000	0.595	0.237	-0.429	-0.847	-0.847	-0.873	-0.427	-0.713	-0.671	-0.370	-0.584	-0.621	-0.581
IS-32	0.791	-0.309	0.846	0.595	1.000	0.584	-0.775	-0.665	-0.664	-0.833	-0.864	-0.717	-0.681	-0.909	-0.735	-0.836	-0.871
VHK	0.822	-0.487	0.854	0.237	0.584	1.000	-0.692	-0.142	-0.142	-0.384	-0.497	-0.598	-0.388	-0.668	-0.296	-0.347	-0.442
SJ'	-0.615	0.639	-0.773	-0.429	-0.775	-0.692	1.000	0.315	0.315	0.585	0.920	0.364	0.297	0.735	0.339	0.461	0.505
PROTO-20	-0.483	0.123	-0.479	-0.847	-0.665	-0.142	0.315	1.000	0.999	0.937	0.434	0.763	0.865	0.366	0.878	0.883	0.826
S-20'	-0.483	0.122	-0.479	-0.847	-0.664	-0.142	0.315	0.999	1.000	0.937	0.434	0.763	0.865	0.366	0.878	0.883	0.826
PNI	-0.691	0.216	-0.669	-0.873	-0.833	-0.384	0.585	0.937	0.937	1.000	0.644	0.833	0.880	0.589	0.873	0.910	0.892
TRÖGER	-0.535	0.477	-0.679	-0.427	-0.864	-0.497	0.920	0.434	0.434	0.644	1.000	0.345	0.343	0.822	0.448	0.585	0.619
MAX-RAE	-0.868	0.038	-0.723	-0.713	-0.717	-0.598	0.364	0.763	0.763	0.833	0.345	1.000	0.928	0.589	0.819	0.811	0.842
KESK-RAE	-0.777	-0.100	-0.597	-0.671	-0.681	-0.388	0.297	0.865	0.865	0.880	0.343	0.928	1.000	0.461	0.956	0.923	0.924
HIQUT	-0.759	0.226	-0.765	-0.370	-0.909	-0.668	0.735	0.366	0.366	0.589	0.822	0.589	0.461	1.000	0.477	0.598	0.686
P-HAUR	-0.704	-0.054	-0.603	-0.584	-0.735	-0.296	0.339	0.878	0.878	0.873	0.448	0.819	0.956	0.477	1.000	0.984	0.965
LOS-A	-0.728	0.043	-0.676	-0.621	-0.836	-0.347	0.461	0.883	0.883	0.910	0.585	0.811	0.923	0.598	0.984	1.000	0.987
P-HAUR*H	-0.806	0.013	-0.716	-0.581	-0.871	-0.442	0.505	0.826	0.826	0.892	0.619	0.842	0.924	0.686	0.965	0.987	1.000
MUOTOC/A	0.774	-0.510	0.852	0.147	0.514	0.978	-0.592	-0.093	-0.093	-0.298	-0.387	-0.562	-0.347	-0.586	-0.270	-0.309	-0.393
MUOTOB/A	0.838	-0.507	0.905	0.217	0.629	0.978	-0.695	-0.216	-0.216	-0.431	-0.522	-0.616	-0.455	-0.656	-0.408	-0.452	-0.531
IS(50)	0.769	-0.274	0.823	0.596	0.995	0.539	-0.724	-0.707	-0.707	-0.846	-0.840	-0.727	-0.711	-0.890	-0.775	-0.870	-0.898
HIQUT*H	-0.848	0.134	-0.799	-0.525	-0.970	-0.605	0.690	0.643	0.643	0.807	0.799	0.770	0.743	0.925	0.772	0.853	0.909
HIQUT*H	-0.846	0.053	-0.761	-0.561	-0.929	-0.525											

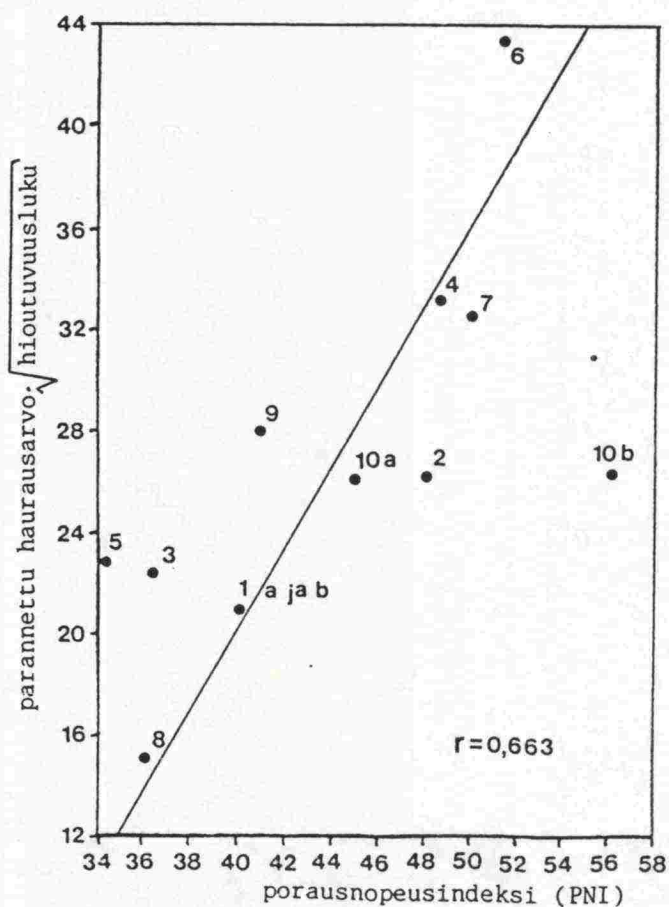
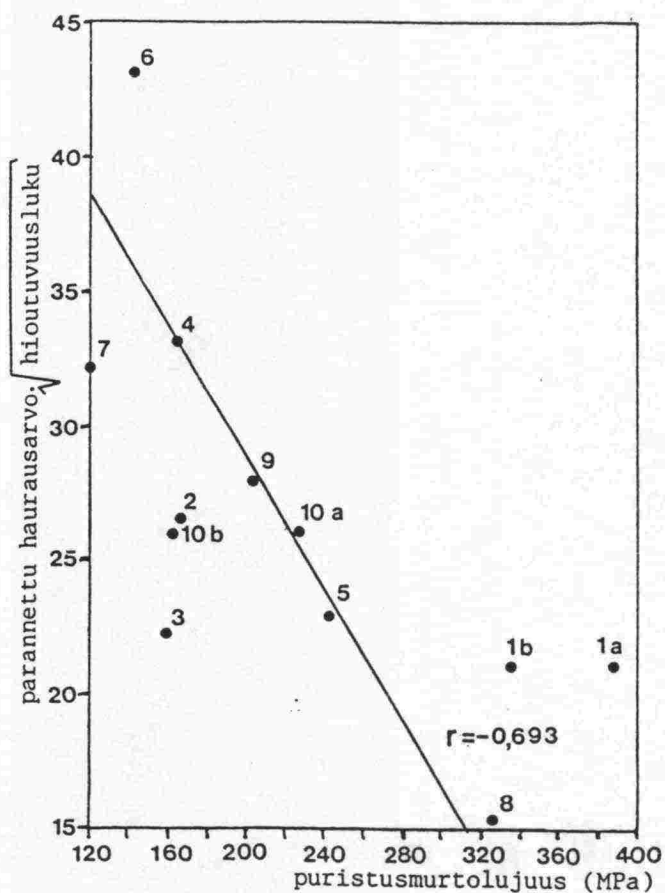
LIITE 8. Lineaariset regressiot selitettävän muuttujan p-haurausarvo: $\sqrt{\text{hioutuvuusluku}}$ ja keskimääräisen mineraalien raekoon ja pistekuormitusindeksin $I_s(50)$:n välille.

8 (1)



Lineaariset regressiot selitettävän muuttujan
p-haurausarvo, $\sqrt{\text{hioutuvuusluku}}$ ja puristusmur-
tolujuuden ja porausnopeusindeksi (PNI) välille.

8 (2)



ISBN 951-46-9786-3

VAPK Kampin VALTIMO
Helsinki 1987